

高信頼性高安全性先行予測反応システムの実現技術

代表研究者 程 京 徳 埼玉大学教授
 共同研究者 吉 田 紀 彦 埼玉大学教授
 〃 多 川 孝 央 九州大学助手

1 背景と目的

電力・通信制御システムや鉄道・航空管制システムや銀行オンラインシステムや大規模 WEB サービスシステムなどの反応的システムは、情報化社会における国民生活の安全・安心の確保にとって益々重要になっている。従来の反応的システムは外部からの刺激に対して受動的にしか反応できないので、信頼性と安全性から見れば、いつも受け身になっており、災害や攻撃に事前に能動的に対処することができない。殆どの災害や攻撃は何らかの前兆がある程度現れるにも関わらず、今まで、外部環境変化を先行的に予測し、しかるべき行動を取って、災害や攻撃による被害を未然に防ぐ反応的システムの研究開発が全く報告されていない。

本研究の代表者が提案した先行予測に基づく反応的システムは、従来の反応的システムに新たに先行予測推論エンジンと自己計測・監視機構を付け加え、システム内部状態と外部環境の変化を計測し監視しながら、災害や攻撃の前兆を検出し、時間相関論理に基づく先行予測推論の結果、および規範相関論理に基づく行動推論の結果に基づいて、しかるべき行動を決め、災害や攻撃による被害を未然に防ぐことを目指す次世代高信頼性高安全性反応的システムである。本研究は、先行予測に基づく反応的システムの構成原理と実現技術を明らかにすると共にその有効性と有用性を実証する。

本研究により、高度情報化社会に要求され、従来の受動的な反応的システムが満たすことができない高信頼性・高安全性を有する、「患を未然に防ぐ」次世代反応的システムの実現可能性が明らかにされる。さらに、その有効性と実用性が実証されれば、反応的システムの斬新的な発展方向になるに違いない。

2 研究方法と研究成果

2.1 時間相関論理

実世界における時間に関連する物事とそれらの間にありえる様々な関係の抽象化・モデル化や、「患を未然に防ぐ」ことにとって不可欠な先行予測推論のために、形式的な表現手段および推論の妥当性を基礎付ける論理基礎がなければいけない。

本研究では、時間に関する様々な性質に対応する時間様相演算子とそれらに関する時間古典論理の様々な公理を、強相関論理に導入し、時間に関する様相命題をおよびそれらの間の相関含意関係を表現し推論すること、即ち、時間的・相関的推論を基礎付ける時間相関論理の様々な体系を構築し、先行予測推論の論理基礎を確立した。

時間相関論理の体系を以下に示す。それらの詳細については、公表論文^{[1][2][6]}を参照されたい。

Primitive logical connectives: $\Rightarrow$ (entailment), $\neg$ (negation), $\wedge$ (extensional conjunction).

Defined logical connectives: $\otimes$ (intensional conjunction, $A \otimes B =_{\text{df}} \neg(A \Rightarrow \neg B)$), $\oplus$ (intensional disjunction, $A \oplus B =_{\text{df}} \neg A \Rightarrow B$), $\Leftrightarrow$ (intensional equivalence, $A \Leftrightarrow B =_{\text{df}} (A \Rightarrow B) \otimes (B \Rightarrow A)$), $\vee$ (extensional disjunction, $A \vee B =_{\text{df}} \neg(\neg A \wedge \neg B)$), $\rightarrow$ (material implication, $A \rightarrow B =_{\text{df}} \neg(A \wedge \neg B)$ or $A \rightarrow B =_{\text{df}} \neg A \vee B$), $\leftrightarrow$ (extensional equivalence, $A \leftrightarrow B =_{\text{df}} (A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow A)$).

Temporal operators: **G** (future-tense always or henceforth operator, **GA** means ‘it will always be the case in the future from now that A’), **H** (past-tense always operator, **HA** means ‘it has always been the case in the past up to now that A’), **F** (future-tense sometime or eventually operator, **FA** means ‘it will be the case at least once in the future from now that A’), **P** (past-tense sometime operator, **PA** means ‘it has been the case at least

once in the past up to now that A'.

Axiom schemata: E1: $A \Rightarrow A$, E2: $(A \Rightarrow B) \Rightarrow ((C \Rightarrow A) \Rightarrow (C \Rightarrow B))$, E2': $(A \Rightarrow B) \Rightarrow ((B \Rightarrow C) \Rightarrow (A \Rightarrow C))$, E3: $(A \Rightarrow (A \Rightarrow B)) \Rightarrow (A \Rightarrow B)$, E3': $(A \Rightarrow (B \Rightarrow C)) \Rightarrow ((A \Rightarrow B) \Rightarrow (A \Rightarrow C))$, E3'': $(A \Rightarrow B) \Rightarrow ((A \Rightarrow (B \Rightarrow C)) \Rightarrow (A \Rightarrow C))$, E4: $(A \Rightarrow ((B \Rightarrow C) \Rightarrow D)) \Rightarrow ((B \Rightarrow C) \Rightarrow (A \Rightarrow D))$, E4': $(A \Rightarrow B) \Rightarrow (((A \Rightarrow B) \Rightarrow C) \Rightarrow C)$, E4'': $((A \Rightarrow A) \Rightarrow B) \Rightarrow B$, E4''': $(A \Rightarrow B) \Rightarrow ((B \Rightarrow C) \Rightarrow (((A \Rightarrow C) \Rightarrow D) \Rightarrow D))$, E5: $(A \Rightarrow (B \Rightarrow C)) \Rightarrow (B \Rightarrow (A \Rightarrow C))$, E5': $A \Rightarrow ((A \Rightarrow B) \Rightarrow B)$, N1: $(A \Rightarrow (\neg A)) \Rightarrow (\neg A)$, N2: $(A \Rightarrow (\neg B)) \Rightarrow (B \Rightarrow (\neg A))$, N3: $(\neg(\neg A)) \Rightarrow A$, C1: $(A \wedge B) \Rightarrow A$, C2: $(A \wedge B) \Rightarrow B$, C3: $((A \Rightarrow B) \wedge (A \Rightarrow C)) \Rightarrow (A \Rightarrow (B \wedge C))$, C4: $(\mathbf{L}A \wedge \mathbf{L}B) \Rightarrow \mathbf{L}(A \wedge B)$, where $\mathbf{L}A =_{\text{df}} (A \Rightarrow A) \Rightarrow A$, D1: $A \Rightarrow (A \vee B)$, D2: $B \Rightarrow (A \vee B)$, D3: $((A \Rightarrow C) \wedge (B \Rightarrow C)) \Rightarrow ((A \vee B) \Rightarrow C)$, DCD: $(A \wedge (B \vee C)) \Rightarrow ((A \wedge B) \vee C)$, C5: $(A \wedge A) \Rightarrow A$, C6: $(A \wedge B) \Rightarrow (B \wedge A)$, C7: $((A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow C)) \Rightarrow (A \Rightarrow C)$, C8: $(A \wedge (A \Rightarrow B)) \Rightarrow B$, C9: $\neg(A \wedge \neg A)$, C10: $A \Rightarrow (B \Rightarrow (A \wedge B))$, IQ1: $\forall x(A \Rightarrow B) \Rightarrow (\forall xA \Rightarrow \forall xB)$, IQ2: $(\forall xA \wedge \forall xB) \Rightarrow \forall x(A \wedge B)$, IQ3: $\forall xA \Rightarrow A[t/x]$ (if x may appear free in A and t is free for x in A , i.e., free variables of t do not occur bound in A), IQ4: $\forall x(A \Rightarrow B) \Rightarrow (A \Rightarrow \forall xB)$ (if x does not occur free in A), IQ5: $\forall x_1 \dots \forall x_n(((A \Rightarrow A) \Rightarrow B) \Rightarrow B) (n \geq 0)$, T1: $\mathbf{G}(A \Rightarrow B) \Rightarrow (\mathbf{G}A \Rightarrow \mathbf{G}B)$, T2: $\mathbf{H}(A \Rightarrow B) \Rightarrow (\mathbf{H}A \Rightarrow \mathbf{H}B)$, T3: $A \Rightarrow \mathbf{G}(\mathbf{P}A)$, T4: $A \Rightarrow \mathbf{H}(\mathbf{F}A)$, T5: $\mathbf{G}A \Rightarrow \mathbf{G}(\mathbf{G}A)$, T6: $(\mathbf{F}A \wedge \mathbf{F}B) \Rightarrow \mathbf{F}(A \wedge \mathbf{F}B) \vee \mathbf{F}(\mathbf{F}A \wedge B)$, T7: $(\mathbf{P}A \wedge \mathbf{P}B) \Rightarrow \mathbf{P}(A \wedge \mathbf{P}B) \vee \mathbf{P}(A \wedge B) \vee \mathbf{P}(\mathbf{P}A \wedge B)$, T8: $\mathbf{G}A \Rightarrow \mathbf{F}A$, T9: $\mathbf{H}A \Rightarrow \mathbf{P}A$, T10: $\mathbf{F}A \Rightarrow \mathbf{F}(\mathbf{F}A)$, T11: $(A \wedge \mathbf{H}A) \Rightarrow \mathbf{F}(\mathbf{H}A)$, T12: $(A \wedge \mathbf{G}A) \Rightarrow \mathbf{P}(\mathbf{G}A)$.

Inference rules: $\Rightarrow$ E: from A and $A \Rightarrow B$ to infer B (Modus Ponens), $\wedge$ I: from A and B to infer $A \wedge B$ (Adjunction), $\forall$ I: if A is an axiom, so is $\forall xA$ (Generalization of axioms), TG: from A to infer $\mathbf{G}A$ and $\mathbf{H}A$ (Temporal Generalization).

以上の定義に基づいて、様々な相関論理、時間相関論理体系は、以下のように定義される。ただし、 $A \mid B$ は、二つの公理図式 A と B の中から 1 つを選ぶことを表する。

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}_{\Rightarrow} &=_{\text{df}} \{E1, E2, E2', E3 \mid E3''\} + \Rightarrow E, \\
\mathbf{E}_{\Rightarrow} &=_{\text{df}} \{E1, E2 \mid E2', E3 \mid E3', E4 \mid E4'\} + \Rightarrow E, \\
\mathbf{E}_{\Rightarrow} &=_{\text{df}} \{E2', E3, E4''\} + \Rightarrow E, \\
\mathbf{E}_{\Rightarrow} &=_{\text{df}} \{E1, E3, E4'''\} + \Rightarrow E, \\
\mathbf{R}_{\Rightarrow} &=_{\text{df}} \{E1, E2 \mid E2', E3 \mid E3', E5 \mid E5'\} + \Rightarrow E, \\
\mathbf{T}_{\Rightarrow, \neg} &=_{\text{df}} \mathbf{T}_{\Rightarrow} + \{N1, N2, N3\}, \\
\mathbf{E}_{\Rightarrow, \neg} &=_{\text{df}} \mathbf{E}_{\Rightarrow} + \{N1, N2, N3\}, \\
\mathbf{R}_{\Rightarrow, \neg} &=_{\text{df}} \mathbf{R}_{\Rightarrow} + \{N2, N3\}, \\
\mathbf{T} &=_{\text{df}} \mathbf{T}_{\Rightarrow, \neg} + \{C1 \sim C3, D1 \sim D3, \text{DCD}\} + \wedge I, \\
\mathbf{E} &=_{\text{df}} \mathbf{E}_{\Rightarrow, \neg} + \{C1 \sim C4, D1 \sim D3, \text{DCD}\} + \wedge I, \\
\mathbf{R} &=_{\text{df}} \mathbf{R}_{\Rightarrow, \neg} + \{C1 \sim C3, D1 \sim D3, \text{DCD}\} + \wedge I, \\
\mathbf{Tc} &=_{\text{df}} \mathbf{T}_{\Rightarrow, \neg} + \{C3, C5 \sim C10\}, \\
\mathbf{Ec} &=_{\text{df}} \mathbf{E}_{\Rightarrow, \neg} + \{C3 \sim C10\}, \\
\mathbf{Rc} &=_{\text{df}} \mathbf{R}_{\Rightarrow, \neg} + \{C3, C5 \sim C10\}, \\
\mathbf{TQ} &=_{\text{df}} \mathbf{T} + \{IQ1 \sim IQ5\} + \forall I, \\
\mathbf{EQ} &=_{\text{df}} \mathbf{E} + \{IQ1 \sim IQ5\} + \forall I, \\
\mathbf{RQ} &=_{\text{df}} \mathbf{R} + \{IQ1 \sim IQ5\} + \forall I, \\
\mathbf{TcQ} &=_{\text{df}} \mathbf{Tc} + \{IQ1 \sim IQ5\} + \forall I, \\
\mathbf{EcQ} &=_{\text{df}} \mathbf{Ec} + \{IQ1 \sim IQ5\} + \forall I, \\
\mathbf{RcQ} &=_{\text{df}} \mathbf{Rc} + \{IQ1 \sim IQ5\} + \forall I, \\
\mathbf{T}_0 \mathbf{Tc} &= \mathbf{Tc} + \{T1 \sim T4\} + \text{TG}, \\
\mathbf{T}_0 \mathbf{Ec} &= \mathbf{Ec} + \{T1 \sim T4\} + \text{TG}, \\
\mathbf{T}_0 \mathbf{Rc} &= \mathbf{Rc} + \{T1 \sim T4\} + \text{TG}, \\
\mathbf{T}_0 \mathbf{TcQ} &= \mathbf{T}_0 \mathbf{Tc} + \{IQ1 \sim IQ5\} + \forall I, \\
\mathbf{T}_0 \mathbf{EcQ} &= \mathbf{T}_0 \mathbf{Ec} + \{IQ1 \sim IQ5\} + \forall I, \\
\mathbf{T}_0 \mathbf{RcQ} &= \mathbf{T}_0 \mathbf{Rc} + \{IQ1 \sim IQ5\} + \forall I.
\end{aligned}$$

ここでは、 $\mathbf{T}_0 \mathbf{Tc}$, $\mathbf{T}_0 \mathbf{Ec}$, $\mathbf{T}_0 \mathbf{Rc}$ は、最も弱い命題時間相関論理である。時間に関する様々な性質に対応する

時間古典論理の様々な公理 $T_5 \sim T_{12}$ を T_0Tc , T_0Ec , T_0Rc に追加すれば、様々な命題時間相関論理体系を得ることができる。述語時間相関論理 T_0TcQ , T_0EcQ , T_0RcQ の場合も同じである。

2.2 並列化による前向き演繹エンジンの高速化

信頼性と安全性の側面から見れば、先行予測に基づく反応的システムの狙いは、「患を未然に防ぐ」ことである。その役目を果たす中心的な構成部分は、先行予測推論のための前向き推論エンジンである。先行予測推論は現実世界の問題について十分事前に推論結果を導き出さなければ、「先行予測」の意味からみれば、全く役に立たない。従って、先行予測に基づく反応的システムの実現と応用に向けて最も重要な課題は、実用に耐えられる高速前向き推論エンジンの開発である。

本研究では、自動前向き演繹の並列計算モデルを設計し、それに基づいて、我々が既に開発した汎用前向き帰結演算システム EnCal を並列化し、先行予測推論のための高速前向き推論エンジンを開発した。

前向き演繹エンジンとは、ある終了条件を満たすまで、与えられた前提や既に導出された結論に論理的推論規則（以下、推論規則）を適用し、前提や既に導出された結論に対して新しい結論を導出し続けるシステムである。自動前向き演繹は、以下の5つの処理をある終了条件を満たすまで繰り返し行う。

- (1) 推論規則選択処理：推論規則集合から1つの推論規則を取り出す。
- (2) 照合処理：推論規則選択処理で取り出された推論規則が必要とする数の前提を前提集合から取り出し、その前提の組合せにその推論規則を適用できるかを調べる。
- (3) 導出処理：照合処理に成功した前提の組合せに推論規則を適用し、結論を導出する。
- (4) 重複検査処理：導出処理で今回導出された結論を前提やその結論が導出される前に導出された結論とマッチングし、今回導出された結論が、それらに対して新しい結論であるかを調べる。
- (5) 追加処理：重複検査処理で新しい結論であると判断された結論を前提集合に追加する。

本研究では、自動前向き演繹の終了条件として、帰結関係を表す論理結合子の入れ子の深さ（級と呼ばれる）を基準とした。ある論理式 F が第 n 級論理式 ($n = 0, 1, \dots$) であるとは、 $\deg(F) = n$ で表し、次のように定義される。ただし、 A と B は論理式である。

- (1) A が $\Rightarrow$ を全く含まない場合、 $\deg(A) = 0$ 。
- (2) $+$ を任意の単項論理結合子とした場合、 $\deg(+A) = \deg(A)$ 。
- (3) $*$ を $\Rightarrow$ 以外の任意の二項論理結合子とした場合、 $\deg(A * B) = \max\{\deg(A), \deg(B)\}$ 。
- (4) $\deg(A \Rightarrow B) = \max\{\deg(A), \deg(B)\} + 1$ 。

本研究では、自動前向き演繹の終了条件として、対象論理体系や形式理論の第 k 級断片を導出するまでということを採用した。この終了条件を利用する場合、自動前向き演繹では、導出された結論の級を計算し、その級が指定された級を超えた場合、その結論は追加処理を適用されない。ある論理体系を $(F(L), |-_L)$ とし、ある自然数を k とする。論理体系 L における第 k 級断片（以下、 $Th^k(L)$ ）とは、以下に定義される論理定理の集合である。

- (1) もし、ある論理式 α が論理体系 L の公理であるならば $\alpha \in Th^k(L)$ である。
- (2) もし、ある論理式 α が $Th^k(L)$ に含まれる論理式に推論規則を適用して得られた第 j 級論理式 ($j \leq k$) であるならば、 $\alpha \in Th^k(L)$ である。
- (3) 上記の(1)と(2)を満たさない論理式は $Th^k(L)$ に属しない。

前向き演繹エンジンの実行時間を短縮するために、マスタ・スレーブモデルに基づき自動前向き演繹の並列計算モデルを設計した。以下の理由から自動前向き演繹の並列化には、マスタ・スレーブモデルが適していると考えられる。(1)自動前向き演繹で行われる各処理は、それが行われる一つ前の処理の結果に依存している。(2)自動前向き演繹で行われる各処理の実行時間に差があるため、各処理を並列化した場合、一つ前の処理結果を待つ時間が大きくなる。(3)重複検査処理と追加処理以外の推論規則選択処理、照合処理と導出処理は、それぞれの前提の組合せに対して、独立に処理を行える。全てのスレーブが、前提と導出された結論の全てを参照できれば、重複検査処理と追加処理も独立に実行できる。しかし、分散メモリ型並列計算機上での実装を考えた場合、全てのスレーブが前提と導出された全ての結論を参照できるとは限らない。このように各スレーブが前提や導出された結論の一部をそれぞれ保持するという場合には、他のスレーブが保持する前提や導出された結論を利用しなければならないため、それらの処理を独立に行なえなくなる。

前提の主記憶領域への配置について二つモデルを設計した。一つは、全てのスレーブが全ての前提を共有するモデル（前提共有モデル）であり、もう一つは各スレーブに前提の一部を分散配置するモデル（前提分散モデル）である。前提共有モデルでは、主記憶領域を全てのスレーブが利用できる全スレーブ共有主記憶領域と各スレーブのみが利用するスレーブ固有主記憶領域にわけた。全スレーブ共有主記憶領域には前提を配置し、スレーブ固有主記憶領域には各スレーブが導出した結論を配置する。前提分散モデルでは、各スレーブがそのスレーブ専用の主記憶領域を持つ。スレーブの数を p とした場合、前提分散モデルでは他のスレーブが保持する前提に対して重複のない前提を、前提の総数の $1/p$ 個ずつ各スレーブ用主記憶領域に配置する。また各スレーブが導出した結論もそのスレーブのスレーブ用主記憶領域に配置する。

設計した自動前向き演繹の並列計算モデルは、以下の通りである。その詳細は、公表論文^{[4][8]}を参照されたい。

- (1) 入力処理：前提，推論規則と終了条件を受け取る。
- (2) マスタ処理：入力処理直後のマスタ処理では、推論規則を全てのスレーブに送信する。それ以外の時、前提共有モデルの場合、マスタ処理では、各スレーブが処理する前提の組合せを静的に決定し、各スレーブに前提の組合せを同じ数ずつ分配する。前提分散モデルの場合、マスタ処理では、各スレーブが保持する前提の数を静的に決定し、各スレーブに同じ数ずつ前提を分配する。
- (3) スレーブ処理：スレーブ処理は、前向き演繹処理とスレーブ間に重複検査処理に分かれる。
 - (3a) 前向き演繹処理：前提共有モデルの場合、推論規則選択処理，照合処理，導出処理と重複検査処理を各スレーブが独立に行う。前提分散モデルの場合、まず、前提取得処理を行ない他のスレーブの前提を取得する。次に、推論規則選択処理，照合処理，導出処理と重複検査処理を他のスレーブに独立に行なう。そして、前提消去処理を行うことにより、他のスレーブから取得した前提を消去する。
 - (3b) スレーブ間重複検査処理：前向き演繹処理で取り除けない重複した結論を取り除く。
- (4) 追加処理：スレーブが導出した結論を前提集合に加える。
- (5) 出力処理：導出された結論を出力する。

なお、上記のマスタ処理，スレーブ処理と追加処理を終了条件が満たされるまで繰り返し行なう。

設計した自動前向き演繹の並列計算モデルに基づいて、汎用前向き自動帰結演算システム EnCal を共有メモリ型並列計算機上と PC クラスタ上で実装した。実装では、一つのプロセッサを一つのスレーブに対応させた。自動前向き演繹の実験では、前提として関連論理 Te, Ee, Re を採用した。実装と実験の詳細は、公表論文^{[4][8]}を参照されたい。

実験の結果から、設計した自動前向き演繹の処理の並列計算モデルに基づいた EnCal の共有メモリ型並列計算機上での実装と PC クラスタ上での実装は、自動前向き演繹の高速化に有効であることがわかった。双方の実装とも、プロセッサ台数が増加する毎に速度向上率は増加した。また、双方の実装とも速度向上率はプロセッサ台数に対して速度向上率は飽和していない。よって、プロセッサ台数を増加させることにより、より一層の速度向上率が得られると考えられる。

2.3 ソフトシステムバス

先行予測に基づく反応的システムは、システム自身と外部環境の状況をいつも正確に把握するために、システム自身と外部環境の状況を計測し監視しなければならない。また、先行予測に基づく反応的システムは、システム自身と外部環境の現在の状態だけでなく、未来の状態も先行的に予測したうえ、しかるべき行動を取るの、原理的に言えば、システムは永続的に動かなければならない。従って、先行予測に基づく反応的システムを実現する必要前提条件として、いつでも止まらずに動作し続ける永続的なシステムを実現しなければならない。そして、運用しているシステムは、故障が生じたときや、攻撃を受けたときや、あるいは保守，更新，機能削減，機能追加などを行うときも、止まらずに動作しサービスを提供し続けなければならない。しかし、現在、故障が生じたとき、攻撃を受けたとき、あるいは保守や更新などを行うときでさえ止まらずに動作しサービスを提供し続ける永続的なシステムはまだ実現に至っていない。既に運用されているシステムや現在開発中のシステムのほとんどは、設計開発の最初から、永続的に動作しサービスを提供し続けるという要求をシステムに対する基本要件としなかった。

本研究では、研究代表者が提案したソフトシステムバスという機構を用いて、先行予測に基づく反応的システムを構成することにした。

ソフトシステムバスとは、概念的に言えば、ソフトウェア技術で実現し、システムにおける部品を繋げるための、データ伝達・保存機能を持つ通信チャンネルである。それは、データ保存機能を持つ基地局とデータ伝達チャンネルをリレー方式で繋ぐことで実現することができる。ソフトシステムバスの最も本質的な特徴は、データ伝達ばかりではなくデータ保存機能を持っていることである。システムのある機能部品が何らかの原因で正常に稼働できない場合、関連のある基地局は、必ずその部品に送ろうとする指令やデータを保存し、その部品が正常に稼働したとき、保存された指令やデータをそれに送らなければならない。構造から見れば、ソフトシステムバスは、直線型と円形型という二つの基本型がありうる。データの流れ方から見れば、ソフトシステムバスは、単方向と双方向という二つの基本型がありうる。したがって、直線単方向型、直線双方向型、円形単方向型、円形双方向型という4種類のソフトシステムバスがありうる。ソフトシステムバスの詳細は、公表論文⁵⁾を参照されたい。

ソフトシステムバスに基づくシステムとは、自己計測、自己監視、自己制御を行う制御部品群と機能部品群を一本または数本のソフトシステムバスで繋げているシステムである。システムの各部品は少なくとも一つの基地局と繋がっている。ソフトシステムバスに基づくシステムにとって、制御部品群はシステムの「心臓」と「脳」と見なし、機能部品群はシステムの「目」、「耳」、「口」、「手」と「足」と見なし、ソフトシステムバスはシステムの「神経」と「血管」と見なすことができる。ソフトウェア・アーキテクチャーの観点から見れば、制御部品群とソフトシステムバスを最も一般的、基本的な構成要素として、機能部品群と色々な形で繋げれば、様々なソフトウェア・アーキテクチャーを構成することができる。ソフトシステムバスに基づくシステムの詳細は、公表論文⁵⁾を参照されたい。

ソフトウェアシステムの設計、開発、保守、進化について、従来の機能指向的な方法論と比べると、ソフトシステムバスに基づくシステム設計、開発、保守と進化方法論は、システム自身の計測と制御を中心にした制御指向的なものである。これは、サービス機能の提供とサービス品質の保証は、システム自身の信頼性、安全性および永続性が保証されてはじめて確実なものになるという提案者の考え（哲学）に基づいているものであり、また、ソフトウェアシステムに対する機能的要求と非機能的要求との明確的な分離、システム信頼性、安全性および永続性を保証する計測、監視、制御部品の汎用化、およびシステムにおける部品同士の接続方式の簡素化、標準化は、「ソフトウェア危機」を解決する現実的な方法だという提案者の信念に基づいているものでもある。

ソフトウェアシステムの設計と開発の観点から見れば、ソフトシステムバスと制御部品群が、あらゆるシステムの非機能要求をも満たす汎用的なものであれば、ソフトシステムバスに基づくシステムの設計者と開発者に標準的、統一的な設計・開発法を提供することができる。設計者と開発者は、システムの機能要求に応じて、各機能部品を設計し開発してから、ソフトシステムバスを用いて制御部品群とそれらと繋げると、システムを構成することができる。異なる対象システムに対しては、異なる機能部品だけを設計し開発すればよい。非機能的要求と機能的要求が明確的に分離され、部品同士の接続方式も標準化されるので、個別の機能部品の設計と開発はシステム全体や他の機能部品の設計と開発に対する依存が少なくなり、システム全体の設計と開発に対する管理もしやすくなるはずである。

ソフトウェアシステムの信頼性と安全性の観点から見れば、ソフトシステムバスと制御部品群は、ソフトシステムバスに基づくシステムの設計者、開発者、保守者に、システムにおける異なる場所で異なるレベルの信頼性と安全性を動的に規定し制御する手段を提供することができる。例えば、故障や攻撃の前兆があった機能部品に対して、故障や攻撃が実際に発生する前にそのサービスを一時的に停止したりそれをシステムから一時的に切り離したりすることで、被害を未然に防ぐことができる。一方、ソフトシステムバスに基づくシステムにおける部品同士の接続方式が標準化され、部品同士間の直接依存関係がほとんどないので、ソフトシステムバスと制御部品群を利用すれば、高信頼性と高安全性を要求する大規模システムの開発と保守は、個別機能部品の設計者、開発者と保守者が他の機能部品の処理内容やシステム全体の振る舞いの詳細を知ることができないという情報隠蔽・秘密分散方式で行うことができる。情報隠蔽・秘密分散方式は、システムの発注者・利用者以外に、設計者や開発者や保守者すらシステムの全貌を知らせたくない高信頼性高安全性システムの開発にとって極めて重要な技術手段である。

先行予測に基づく反応的システムは、ソフトシステムバスに基づくシステムとして構成すれば、故障や攻撃の前兆を検出し、故障や攻撃の前兆があった機能部品に対して、ソフトシステムバス技術を用いて、故障や攻撃が実際に発生する前にそのサービスを一時的に停止したりそれをシステムから一時的に切り離したりすることに

よって被害を未然に防ぐことができる。

2.4 先行予測に基づく反応的システムのプロトタイプ実現

これまでの研究成果を統合して、先行予測に基づく反応的システムのプロトタイプを設計し開発した。その詳細は、公表論文^{[3][7][9-12]}を参照されたい。

また、事例研究として、超高層ビルにおけるエレベータシステムのシミュレーションプログラムを開発し、上記のプロトタイプと合わせて、先行予測に基づく永続的反応システムとして構成し、火災の蔓延に対する予測に基づいてビル内の人々をできるだけ多く救出するという見方から、有効性を評価し実証している。もう1つの事例として、研究代表者の研究室で開発した汎用電子アンケート・投票サーバ ENQUETE-BAISE の複数の認証局と複数の集計局を機能部品として、上記のプロトタイプと合わせて、先行予測に基づく反応的システムとして構成し、ネットワークからの攻撃に対する予測に基づいてアンケート・投票データを保護しながらアンケート・投票を続行するという見方から、有効性を評価し実証している。

3 本研究に関連する公表論文

- [1] Jingde CHENG: Temporal Relevant Logic as the Logical Basis of Anticipatory Reasoning-Reacting Systems, in D. M. Dubois (Ed.), “Computing Anticipatory Systems: CASYS 2003-Sixth International Conference, Liege, Belgium, 11-16 August 2003,” AIP Conference Proceedings, Vol. 718, pp. 362-375, American Institute of Physics, August 2004. (Best Paper Award awarded at the Sixth International Conference on Computing Anticipatory Systems)
- [2] Jingde CHENG: Spatio-temporal Relevant Logic as the Logical Basis for Specifying, Verifying, and Reasoning about Mobil Multi-agent Systems, in S. Wang, K. Tanaka, et al. (Eds.), “Conceptual Modeling for Advanced Application Domains, ER 2004 Workshops CoMoGIS, CoMWIM, ECDM, CoMoA, DGOV, and eCOMO, Shanghai, China, November 2004, Proceedings,” Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3289, pp. 470-483, Springer-Verlag, November 2004.
- [3] Feng SHANG and Jingde CHENG: Towards Implementation of Anticipatory Reasoning-Reacting Systems, International Journal of Computing Anticipatory Systems, Vol. 14, pp. 93-109, CHAOS, December 2004.
- [4] Yuichi GOTO, Shinsuke NARA, and Jingde CHENG: Efficient Anticipatory Reasoning for Anticipatory Systems with Requirements of High Reliability and High Security, International Journal of Computing Anticipatory Systems, Vol. 14, pp. 156-171, CHAOS, December 2004.
- [5] Jingde CHENG: Connecting Components with Soft System Buses: A New Methodology for Design, Development, and Maintenance of Reconfigurable, Ubiquitous, and Persistent Reactive Systems, Proceedings of the 19th IEEE-CS International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Vol. 1, pp. 667-672, Taipei, Taiwan, March 2005.
- [6] Jingde CHENG: Strong Relevant Logic as the Universal Basis of Various Applied Logics for Knowledge Representation and Reasoning, Proceedings of the 15th European-Japanese Conference on Information Modelling and Knowledge Bases, pp. 277-287, Tallinn, Estonia, May 2005.
- [7] Feng SHANG and Jingde CHENG: Anticipatory Agents Based on Anticipatory Reasoning, in M. S. Hacid, N. Murray, Z. W. Ras, S. Tsumoto (Eds.), “Foundations of Intelligent Systems, 15th International Symposium, ISMIS 2005, Saratoga Springs, USA, May 25-28, 2005, Proceedings,” Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 3488, pp. 445-455, Springer-Verlag, May 2005.
- [8] 奈良信介, 後藤祐一, 程京徳: 並列化による前向き演繹エンジンの高速化, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol. 46, No. SIG 10 (TOM 12), pp. 19-29, 2005年6月.
- [9] Jingde CHENG and Feng SHANG: Persistent Computing Systems as an Infrastructure of Computing Anticipatory Systems, 7th International Conference on Computing Anticipatory Systems, Symposium 4, Liege, Belgium, August 2005.
- [10] Feng SHANG, Shinsuke NARA, Takashi OMI, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: A Prototype

Implementation of an Anticipatory Reasoning-Reacting System, 7th International Conference on Computing Anticipatory Systems, Symposium 4, Liege, Belgium, August 2005.

- [11] Shinsuke NARA, Feng SHANG, Takashi OMI, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: An Anticipatory Reasoning Engine for Computing Anticipatory Systems, 7th International Conference on Computing Anticipatory Systems, Symposium 5, Liege, Belgium, August 2005.
- [12] Shinsuke NARA, Takashi OMI, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: A General-purpose Forward Deduction Engine for Modal Logics, in R. Khosla, R. J. Howlett, and L. C. Jain (Eds.), "Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems, 9th International Conference, KES 2005, Melbourne, Australia, 14-16 September, 2005, Proceedings, Part II," Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 3682, pp. 739-745, Springer-Verlag, September 2005.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
Temporal Relevant Logic as the Logical Basis of Anticipatory Reasoning-Reacting Systems	AIP Conference Proceedings, Vol. 718, pp. 362-375, American Institute of Physics	August 2004
Spatio-temporal Relevant Logic as the Logical Basis for Specifying, Verifying, and Reasoning about Mobile Multi-agent Systems	Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3289, pp. 470-483, Springer-Verlag	November 2004
Towards Implementation of Anticipatory Reasoning-Reacting Systems	International Journal of Computing Anticipatory Systems, Vol. 14, pp. 93-109	December 2004
Efficient Anticipatory Reasoning for Anticipatory Systems with Requirements of High Reliability and High Security	International Journal of Computing Anticipatory Systems, Vol. 14, pp. 156-171	December 2004
Connecting Components with Soft System Buses: A New Methodology for Design, Development, and Maintenance of Reconfigurable, Ubiquitous, and Persistent Reactive Systems	Proc. 19th IEEE-CS International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Vol. 1, pp. 667-672	March 2005
Anticipatory Agents Based on Anticipatory Reasoning	Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 3488, pp. 445-455, Springer-Verlag	May 2005
並列化による前向き演繹エンジンの高速化	情報処理学会論文誌「数理モデル化と応用」, Vol. 46, No. 10, pp. 19-29	2005年 6 月
Persistent Computing Systems as an Infrastructure of Computing Anticipatory Systems	The 7th International Conference on Computing Anticipatory Systems, Symposium 4, Liege, Belgium	August 2005
A Prototype Implementation of an Anticipatory Reasoning-Reacting System	The 7th International Conference on Computing Anticipatory Systems, Symposium 4, Liege, Belgium	August 2005
An Anticipatory Reasoning Engine for Anticipatory Reasoning-Reacting Systems	The 7th International Conference on Computing Anticipatory Systems, Symposium 5, Liege, Belgium	August 2005
A General-purpose Forward Deduction Engine for Modal Logics	Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 3682, pp. 739-745, Springer-Verlag	September 2005