

平成22年6月11日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006年度～2009年度

課題番号：18300005

研究課題名（和文）先行予測に基づく反応的システムの実現と応用

研究課題名（英文）Implementation and Applications of Anticipatory Reasoning-Reacting Systems

研究代表者

程 京徳（Cheng Jingde）

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：30217228

研究成果の概要（和文）：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、異常や攻撃に事前に能動的に対処することができない。先行推論反応システムは、被害を未然に能動的に防ぐために、高信頼性高安全性を有する次世代反応的システムとして研究代表者により提案されたものである。本研究は、時間相関論理に基づく先行予測推論、規範相関論理に基づく行動推論、汎用高速前向き推論エンジン、永続計算を実現するためのミドルウェアなど、先行推論反応システムの実現にとって必要な基盤技術を開発したと共に、応用事例研究を通じて、先行推論反応システムの有効性と有用性を実証した。

研究成果の概要（英文）：Almost all existing reactive systems are passive from the viewpoint of reliability and security, because they can only perform the operations in response to external stimulus but have no ability to response to disasters and attacks, and deal with them actively. Anticipatory Reasoning-Reacting Systems was proposed as a new type of reactive system with high reliability and high security that detect and predict omens of attacks and failures anticipatorily, take some actions to inform its users, and perform some operations to defend attacks and failures by themselves. In this research, we have developed some basic techniques including anticipatory reasoning based on temporal relevant logics, action reasoning based on deontic relevant logics, a forward reasoning engine with general-purpose, and a middleware for persistent computing, and showed the effectiveness of Anticipatory Reasoning-Reacting Systems by some case studies.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	5,400,000	1,620,000	7,020,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：ソフトウェア工学、反応的システム、永続計算システム、先行推論、時間相関論理、行動推論、規範相関論理、汎用先行推論エンジン

1. 研究開始当初の背景

反応的システムとは、外部環境からの刺激（要求）に反応し、適切なタイミングで要求に応じる処理を繰り返す過程を維持するシステムのことである。今日の高度情報化社会においては、航空管制システム、鉄道運行管理システム、電力ネットワークシステム、通信ネットワークシステム、銀行オンラインシステム、大規模 WEB サービスシステムなど様々な反応的システムは人々の日常生活を支えており、これらの反応的システムの信頼性と安全性は、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。

しかし、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。また、従来の反応的システムは、故障が生じるときは勿論、正常な定期的保守作業のときもシステム全体を停止させなければならない。国民生活の安全・安心の確保の観点から見れば、異常や攻撃の前兆を検出し被害を未然に防ぐことができる、なおかつ、故障が生じるときや保守を行うときにさえ止まらずにいつでも動作し続ける反応的システムが極めて望ましい。

反応的システムの信頼性と安全性をソフトウェア工学と情報セキュリティ工学の立場から研究している本研究代表者は、先行性という概念を反応的システムに導入すれば、被害を未然に能動的に防ぐという全く新しい観点から反応的システムの構成原理と実現技術を研究する分野を新たに開拓することができると考えた。そして、高信頼性高安全性を有する次世代反応的システムとして、先行推論反応システムという新しいタイプの反応的システムを提案した。先行推論反応システムとは、簡単に言うと、従来の反応的システムに新たにシステム自身の振る舞いとシステムの外部環境に関する予測モデルおよび先行推論エンジンを付け加え、システムの内部状態と外部環境の変化を計測、監視しながら、システムの振る舞いと外部環境の変化に対して先行推論を用いて予測した結果に基づいて、システム自身が次のしかるべき動作を決める反応的システムのことである。このような反応的システムは、先行性の観点から見れば、実際に、計算の永続性をも暗黙的に要求している。

2. 研究の目的

被害を未然に防ぐために有効、かつ、有用な次世代反応的システムとして先行推論に基づく永続的反応システムを実際に実現するためには、多くの挑戦的な科学・技術課題を解決しなければならない。

本研究は、高信頼性高安全性を有する先行推論に基づく永続的反応システムの実用化のために、その実現技術を明らかにすると共に、実際の開発事例研究を通じて、その有効性と有用性を実証することを目指している。

3. 研究の方法

先行推論反応システムは、本当に被害を未然に防ぐために、先行推論に基づいて、信頼度と精度の高い予測結果を時間的に十分早い段階で的確に予測しなければならない。

推論（すること）とは、与えられた前提（既知の事実や仮定した仮説）から、新しい結論を導き出すこと（過程）であり、一般的に、秩序の整う一連の論証からなる。従って、推論とは、既に知っている事柄あるいは仮定からまだ知られていない事柄を導き出すことであり、我々の知識を広げる手段である。ここで言う「導き出す」ことをでたらめに行うのは当然意味がなく何らかの基準に基づいて行うべきである。基づいた基準によっては様々な異なる推論が有り得る。しかし、最も基本的な基準は論理（学）基準である。なぜなら、論理学はあらゆる推論・論証の正しさを評価するために不可欠な普遍基準を体系的に研究する学問だからである。

一方、予測がどのような方法で行われるとしてもその目的は未来のことを推測することであるので、いかなる予測も推論であると言える。逆に、推論は必ずしも未来のことを導き出すことではないので、すべての推論は必ずしも予測ではない。いかなる予測も推論であれば、推論の最も基本的な基準も予測の最も基本的な基準であるはずであろう。すなわち、様々な予測を共通的に基礎づけているのは論理（学）基準であろう。

先行推論とは、与えられた前提から、推論を行う時点でその発生と真偽が確実ではない将来の事柄に関する結論を導き出す推論である。従って、先行推論は、必ず1つの時間点を参照点としており、その時間点に対して先行推論の結論はすべて予測結果になる。

哲学および論理学においては、従来、様々な哲学的な観点から様々な目的で多くの論理体系が提案されてきた。しかし、必ずしもどのような論理体系も先行推論による予測の論理基礎に成り得るわけではない。先行推論による予測を基礎づける論理体系は、少なくとも幾つかの基本要求を満たさなければならない。

まず、推論の妥当性の一般的な基準として、その論理体系は、拡充的推論、相関的推論、および真理値保存的推論を基礎づけるなければならない。ある論理体系はある性質を持つ推論を基礎づけるとは、その論理体系に基づいて妥当であると見なされる任意の推論が必ずその性質を持つことである。拡充的推論とは、結論の真理性が決して前提に含まれていない推論であり、相関的推論とは、結論が必ず前提と関係している推論であり、真理値保存的推論とは、前提が真であれば結論も必ず真である推論である。与えられた前提から新しい結論を導き出すことこそ推論であると定義すると、この基本要求で保証する推論の拡充性、相関性、および真理値保存性のどれも先行推論にとって本質的に重要で不可欠な性質であり、信頼度の高い予測結果を得るためにも極めて重要である。拡充性がなければ、推論は同語反復になり新しい結論を得られなく、当然、予測にもなれない。相関性がなければ、推論の結論は前提と無関係なことになり、意味のある結果を得られなく、当然、信頼できる予測結果にもなれない。真理値保存性がなければ、推論の結論の真理性が保証されず真の結果を得られなく、当然、信頼できる予測結果にもなれない。

次に、その論理体系は、準完全推論と準整合推論を基礎づけるなければならない。準完全推論とは、与えられた前提はすべての情報を含んでいることを仮定しない推論であり、準整合推論とは、与えられた前提は矛盾を含んでいないことを仮定しない推論である。少し専門的な言葉で言い換えると、準完全推論とは、閉世界仮説（真か偽かわからないものは全て偽であると見なす）を仮定しない推論であり、準整合推論とは、爆発原理（矛盾から何を導き出してもよい）を仮定しない推論である。この基本要求は、意図的に綺麗に定義された理想世界における物事ではなく現実世界における物事に関する先行推論にとって重要で不可欠であり、予測のための推論にとって特に重要である。現実世界では、我々が完全で無矛盾な情報に基づいて推論したり予測したりすることがむしろまれで、常に不完全、場合によって暗黙に矛盾がある情報に基づいて推論し予測しなければならない。

最後に、その論理体系は、時間的推論を

基礎づけるなければならない。時間的推論とは、時間に関する様相命題およびそれらの間の関係に関する推論である。この基本要求は、そもそも概念的に時間に関する先行推論にとって本質的に重要で不可欠であり、予測のための推論にとって特に重要である。

現存の殆どの論理体系が上記の三つの基本要求をすべて満たすことができず、時間相関論理が上記の三つの基本要求をすべて満たす唯一の論理体系である。なお、時間相関論理は、時間に関する様相演算子とそれらの性質に関する公理を強相関論理に導入し拡張した論理体系である。

先行推論による予測を基礎づけることにとって妥当な論理体系の選定は、信頼度の高い予測結果を得る保証だけであり、時間的に十分早い段階で予測結果を得る保証ではない。形式論理体系に基づく推論による予測方法における推論は、一般的に推論エンジンと呼ばれるプログラムによって実行する。その入力は、観察した現象、理論モデルおよび経験則を表現した論理式であり、推論プロセスが、論理基礎である形式論理体系によって規定された論理基準に基づいて自動化され、出力は予測結果である。従って、一般的に、推論エンジンの効率性、予測結果を早く得ることによって、決定的なことである。

有効、かつ、有用な次世代反応的システムとして先行推論に基づく永続的反応システムを実際実現するために、事例研究を通じて、実証を行うことは極めて重要である。

4. 研究成果

(1) 時間相関論理に基づいた汎用先行推論エンジンを開発した。

研究代表者の研究室が開発した汎用前向き帰結演算システム EnCal を改造し、時間相関論理に基づいた汎用先行推論エンジンを開発し、その原理と有効性の検証を行った。

(2) 先行予測に基づく反応システムのプロトタイプを実現した。

超高層ビルにおける火災発生と蔓延のシミュレーションプログラムを開発し、超高層ビルのエレベータ制御システムを先行予測に基づく反応システムとして開発しその有効性の実証を行った。

(3) 時間順序を考慮した行動推論の妥当性を基礎付けるための時間規範相関論理を提案した。

先行予測に基づく反応的システムは、先行予測推論により、発生しうる事象を推測した後、どんなしかなるべき行動をどのように取るべきかを決定しなければならない。

本研究では、許可、禁止、勧誘に関する様々な性質に対応する規範様相演算子とそれらに関する規範古典論理の様々な公理を、時間相関論理に導入し、時間順序を考慮した行動推論の妥当性を基礎付けるための時間規範相関論理を提案した。

(4) 3次元時空間相関論理を提案した。

3次元空間領域における空間領域間の隣接関係、点の場所と到達可能関係、動いている物体間の相対的速さに関する基本述語と公理を時間相関論理に導入し、3次元空間領域における物体の動きについての推論の妥当性を基礎付けるための3次元時空間相関論理を提案した。

(5) 汎用前向き推論エンジン **FreeEnCal** を開発した。

時間相関論理に基づいて先行推論、規範相関論理に基づいて行動推論、演繹的推論、帰納的推論、仮説生成的推論など様々な前向き推論を、利用者により定義され提示された推論規則に基づいて自動的に実行できる汎用前向き推論エンジン **FreeEnCal** を開発した。

(6) 内包的な連言と内包的な選言を持つ基本的相関論理の关系的意味論を構築した。

恒真定数、相関的含意、相関論理における内包的連言結合子と内包的選言結合子より更に弱い内包的連言結合子と内包的選言結合子を **Dunn** の分配束論理 **DLL** に導入し拡張した基本的論理体系の关系的意味論を構築した。また、否定を含む場合の关系的意味論も示した。

(7) 時空間相関論理に基づいて定性的行動推論手法を提案した。

定量的行動推論は、先行推論に基づく反応的システムにとって、限定されている時間内に結論を導けない問題点を指摘し、時空間相関論理に基づいて定性的行動推論手法を提案した。

(8) 汎用前向き推論エンジン **FreeEnCal** の高速化を行った。

開発した汎用前向き推論エンジン **FreeEnCal** における前向き推論アルゴリズムと中間結果重複検査アルゴリズムを改良し、**FreeEnCal** の高速化を行った。

(9) 航空管制に先行推論に基づく反応システムを応用することを提案した。

典型的な反応システムである航空管制システムにおいて先行推論に基づく反応システムを応用することを提案し、実際の事例研究として先行推論に基づく反応システムを用いて空港離着陸管制を実現することについて調査した。また、空港離着陸管制において、行動推論に基づいて意思決定機構を提案しその有効性の実証を行った。

(10) 永続計算を実現するためのミドルウェアを提案しそのプロトタイプを実現した。

ピアツーピアネットワークに基づいてソフトウェアシステムバスを実現する方法を提案し、設計したミドルウェアのプロトタイプ(数十個のデータ・指令基地局と数百個の機能部品を持つシミュレータ)を作成し、それを使って実験を行い、実用の観点からその可用性、拡張性、効率性、コストを評価した結果、新しいミドルウェアは十分実用的なものであることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計12件) (全て査読有)

- ① Takahiro Koh, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: A Fast Algorithm for Derivation Process in Forward Reasoning Engines, International Journal of Computational Science, Vol. 4, No. 3, Global Information Publisher, July 2010.
- ② 程 京徳: 先行推論に基づく永続的応答システム(招待論文), Telecom Frontier, SCAT Technical Journal, No. 65, pp. 34-41, テレコム先端技術研究支援センター, 2009年11月.
- ③ Yuichi GOTO, Takumi ENDO, and Jingde CHENG: Continuous Reactability of Persistent Computing Systems, International Journal of Computing Anticipatory Systems, Vol. 20, pp. 219-229, CHAOS, December 2008.
- ④ Natsumi KITAJIMA, Shinsuke NARA, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: A Deontic Relevant Logic Approach to Reasoning about Actions in Computing Anticipatory Systems, International Journal of Computing Anticipatory Systems, Vol. 20, pp. 177-190, CHAOS, December 2008.
- ⑤ Mohammad Reza SELIM, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: A Low Cost and Resilient Message Queuing Middleware, International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 8, No. 8, pp. 225-237, August 2008.
- ⑥ Ying GAO and Jingde CHENG: Semantics for a Basic Relevant Logic with Intensional Conjunction and Disjunction (and some of its Extensions), Mathematical Structures in Computer Science, Vol. 18, No. 1, pp. 145-164, Cambridge University Press, February 2008.
- ⑦ Jingde CHENG: Persistent Computing Systems Based on Soft System Buses as an

- Infrastructure of Ubiquitous Computing and Intelligence (Invited Paper), Journal of Ubiquitous Computing and Intelligence, Vol. 1, No. 1, pp. 35-41, American Scientific Publishers, April 2007.
- ⑧ Yuichi GOTO and Jingde CHENG: A Quantitative Analysis of Implicational Paradoxes in Classical Mathematical Logic, Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 169, pp. 87-97, Elsevier B.V., March 2007.
- ⑨ Ying GAO and Jingde CHENG: Semantics for a Basic Relevant Logic with Intensional Conjunction and Disjunction, Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Vol. 169, pp. 61-71, Elsevier B.V., March 2007.
- ⑩ Shinsuke NARA, Feng SHANG, Takashi OMI, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: An Anticipatory Reasoning Engine for Computing Anticipatory Systems, International Journal of Computing Anticipatory Systems, Vol. 18, pp. 225-234, CHAOS, December 2006.
- ⑪ Jingde CHENG and Feng SHANG: Persistent Computing Systems as an Infrastructure of Computing Anticipatory Systems, International Journal of Computing Anticipatory Systems, Vol. 18, pp. 61-74, CHAOS, December 2006.
- ⑫ 程 京德: 先行推論による予測とその論理基礎 (招待論文), 日本信頼性学会誌「信頼性」, Vol. 28, No. 7, pp. 451-460, 日本信頼性学会, 2006年11月.
- [学会発表] (計 18 件) (全て査読有)
- ① Natsumi KITAJIMA, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: Development of a Decision-Maker in an Anticipatory Reasoning-Reacting System for Terminal Radar Control, in E. Corchado, X. Wu, and E. Oja (Eds.), "Hybrid Artificial Intelligence Systems, 4th International Conference, HAIS09, Salamanca, Spain, June 10-12, Proceedings," Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 5572, pp. 68-76, Springer-Verlag, June 2009.
- ② Youcheng CHEN, Mohammad Reza SELIM, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: An Improvement of REM: A Replication Oriented Event-based Middleware, Proceedings of the 4th International Conference on Availability, Reliability and Security, pp. 641-646, Fukuoka, Japan, IEEE Computer Society Press, March 16-19, 2009.
- ③ Jingde CHENG: Qualitative Spatio-temporal Reasoning about Moving Objects in Three-dimensional Space, in L. Kang, et al. (Eds.), "Advances in Computation and Intelligence: Third International Symposium, ISICA 2008, Wuhan, China, December 19-21, 2008, Proceedings," Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5370, pp. 637-648, Springer-Verlag, December 2008.
- ④ Jingde CHENG: Testing and Debugging Persistent Computing Systems: A New Challenge in Ubiquitous Computing, Proceedings of the 5th IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing, Vol. 1, pp. 408-414, Shanghai, China, IEEE Computer Society Press, December 17-20, 2008.
- ⑤ Jingde CHENG, Yuichi GOTO, and Natsumi KITAJIMA: Anticipatory Reasoning about Mobile Objects in Anticipatory Reasoning-Reacting Systems (Invited Paper), in D. M. Dubois (Ed.), "Computing Anticipatory Systems: CASYS 2007 - Eighth International Conference, Liege, Belgium, 6-11 August 2007," AIP Conference Proceedings, Vol. 1051, pp. 244-254, The American Institute of Physics, November 2008. (Best Paper Award awarded at the Eighth International Conference on Computing Anticipatory Systems)
- ⑥ Jingde CHENG: Adaptive Prediction by Anticipatory Reasoning Based on Temporal Relevant Logic, Proceedings of the 8th International Conference on Hybrid Intelligent Systems, pp. 410-416, Barcelona, Spain, IEEE Computer Society Press, September 10-12, 2008.
- ⑦ Yuichi GOTO, Takahiro KOH, and Jingde CHENG: A General Forward Reasoning Algorithm for Various Logic Systems with Different Formalizations, in I. Lovrek, R. J. Howlett, and L. C. Jain (Eds.), "Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, 12th International Conference, KES 2008, Zagreb, Croatia, September 3-5, 2008, Proceedings," Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 5178, pp. 526-535, Springer-Verlag, September 2008.
- ⑧ Takahiro KOH, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: A Fast Duplication Checking Algorithm for Forward Reasoning Engines, in I. Lovrek, R. J. Howlett, and L. C. Jain (Eds.), "Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, 12th International Conference, KES 2008, Zagreb, Croatia, September 3-5, 2008,

- Proceedings,” Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 5178, pp. 499-507, Springer-Verlag, September 2008.
- ⑨ Mohammad Reza SELIM, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: Ensuring Reliability and Availability of Soft System Bus, Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Secure System Integration and Reliability Improvement, pp. 52-59, The IEEE Reliability Society and The IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, Yokohama, Japan, July 14-17, 2008.
- ⑩ Natsumi KITAJIMA, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: Fast Qualitative Reasoning about Actions for Computing Anticipatory Systems, Proceedings of the 3rd International Conference on Availability, Reliability and Security, pp. 171-178, Barcelona, Spain, IEEE Computer Society Press, March 4-7, 2008.
- ⑪ Takumi ENDO, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: Measuring Reactability of Persistent Computing Systems, in M. Lumpe and W. Vanderperren (Eds.), “Software Composition, 6th International Symposium, SC 2007, Braga, Portugal, March 24-25, 2007, Revised Selected Papers,” Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4829, pp. 144-151, Springer-Verlag, December 2007.
- ⑫ Mohammad Reza SELIM, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: A Replication Oriented Approach to Event Based Middleware Over Structured Peer to Peer Networks, Proceedings of the 5th International Workshop on Middleware for Pervasive and Ad-Hoc Computing: held at the ACM/IFIP/USENIX 8th International Middleware Conference, pp. 61-66, Newport Beach, USA, ACM Press, November 26-30, 2007.
- ⑬ Jingde CHENG, Shinsuke NARA, and Yuichi GOTO: FreeEnCal: A Forward Reasoning Engine with General-Purpose, in B. Apolloni, R. J. Howlett, and L. C. Jain (Eds.), “Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, 11th International Conference, KES 2007, Vietri sul Mare, Italy, September 12-14, 2007, Proceedings, Part II,” Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 4693, pp. 444-452, Springer-Verlag, September 2007.
- ⑭ Mohammad Reza SELIM, Takumi ENDO, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: Distributed Hash Table based Implementation of Soft System Buses, Proceedings of the 2nd International Conference on Scalable Information Systems, ACM International Conference Proceeding Series, Vol. 304, Suzhou, China, ACM Press, June 6-8, 2007.
- ⑮ Ying GAO and Jingde CHENG: Operational Semantics for Positive Relevant Logics without Distribution, in S. B. Cooper, B. Loewe, and A. Sorbi (Eds.), “Computation and Logic in the Real World, Third Conference on Computability in Europe, CiE 2007, Siena, Italy, June 18-23, 2007, Proceedings,” Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4497, pp. 325-335, Springer-Verlag, June 2007.
- ⑯ Jingde CHENG, Yuichi GOTO, Masami SOMEYA, and Takumi ENDO: Persistent Computing Systems as an Infrastructure for Pervasive Services, Proceedings of the 1st International Symposium on Pervasive Computing and Applications, pp. 104-109, Urumchi, China, IEEE, August 3-5, 2006.
- ⑰ Feng SHANG, Shinsuke NARA, Takashi OMI, Yuichi GOTO, and Jingde CHENG: A Prototype Implementation of an Anticipatory Reasoning-Reacting System (Invited Paper), in D. M. Dubois (Ed.), “Computing Anticipatory Systems: CASYS 2005 – Seventh International Conference, Liege, Belgium, 8-13 August 2005,” AIP Conference Proceedings, Vol. 839, pp. 401-414, American Institute of Physics, June 2006.
- ⑱ Jingde CHENG: Persistent Computing Systems as Continuously Available, Reliable, and Secure Systems, Proceedings of the 1st International Conference on Availability, Reliability and Security, pp. 631-638, Vienna, Austria, IEEE Computer Society Press, April 20-22, 2006.
- 〔図書〕 (計 0 件)
 〔産業財産権〕
 ○出願状況 (計 0 件)
 ○取得状況 (計 0 件)
 〔その他〕
 ホームページ等
6. 研究組織
 (1)研究代表者
 程 京徳 (Cheng Jingde)
 埼玉大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号: 30217228
 (2)研究分担者
 後藤 祐一 (Goto Yuichi)
 埼玉大学・大学院理工学研究科・助教
 研究者番号: 70400801