

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2016

課題番号：25540101

研究課題名(和文) 間主観の形式化を支援するための分散推論機構とセンサーネットワークへの応用

研究課題名(英文) Distribute Inference to Support Inter-subjective Formalization and its Application to Sensor Networks

研究代表者

沼尾 正行 (Numao, Masayuki)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：30198551

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：分散配置されたハードウェアのネットワーク全体で、高階の述語計算を行う方法を提案した。高階の述語を両辺に持つ規則で書き換える機構を実現するのに、計算ノード上にスイッチ、状態記憶と演算回路を配置する。規則中のリテラル L_i, R_i が、「(引数 $1, \dots, \text{引数}p$)」と記述されるとする。通常、引数 1 に述語名を書くが、変数を置くことで高階の柔軟な処理をする。ルールの形式は、「 $L_1, \dots, L_m :- R_1, \dots, R_n$ 。」とする。この形の規則を注意深く記述することで、各種の論理や代数の計算が行える。プロダクションシステムに似ているが、作業記憶を分散配置することで、分散システムにも適した方法となる。

研究成果の概要(英文)：We usually prove logical formulas by rewriting them step by step. Reduction machines have been proposed for functional programming languages to make an inference based on such a rewriting mechanism. However, it has not been efficient in distributed environment, since they rewrite a logical formula on a memory by using processors. A computer network has many switches, and transfers packets to their destinations. We propose to rewrite a formula in logic or algebra on distributed switches and state memories with higher-order meta-rules. Although such inference seems similar to one by a production rule in expert systems, it utilizes distributed working memories and self-optimizing properties in their inference with meta-rules. We show this mechanism is appropriate for weight-based learning for controlling its inference, and inter-subjective formalization for a sensor network in Empathic Computing.

研究分野：人工知能

キーワード：間主観 論理型言語 分散推論 帰納論理プログラミング FPGA センサーネットワーク

1. 研究開始当初の背景

論理型言語は、コワルスキー (Robert Kowalski) による述語論理式 (ホーン節) のプログラムの解釈に基づいて、その基本的な考え方が確立した。この解釈は 1970 年代の比較的単純な計算環境にはよくマッチしており、1980 年代に第五世代コンピュータの基盤言語として論理型言語 Prolog が採用されたことは、よく知られている。しかしながら、1980 年代には、LSI 技術の進歩によりマイクロプロセッサが普及し、計算機はミニコンピュータからワークステーション、パソコン、組み込みシステム (Embedded system)、ユビキタスコンピューティングへと小型分散化の一途を辿った。計算は単一の中央処理装置ではなく、分散したネットワーク上で行われるようになり、現在の主流はクラウドコンピューティングである。第五世代コンピュータが一般には普及しなかったのは、論理型言語は、並列化には対応したものの分散ネットワーク化された計算環境で利点がなかったからである。また、論理型言語を並列化した際にホーン節のプログラムの解釈の面が強調され、論理との対応が希薄になったため、論理に基づいているメリットが発揮できなくなった。論理型プログラミングの誤謬と言われ、論理は抽象的なもので、論理でプログラミングをする必要はなく、論理で記述したものを通常の手続き型言語で記述し直して、プログラミングするのが正しいということになった。論理を高級言語として使用する考え方自体に疑問が持たれ、現在に至っている。従来の手続き型言語によるプログラミングは、分散環境ではますます困難になっていることは変わらない。しかし、論理型言語もプログラムの解釈ばかりが拡大され、バックトラックを抑制する方向に進化した。ガードにより、バックトラックを抑えて使用するので、分散環境では、手続き型言語と同じように記述は複雑で、実行を一つ一つ追いながらプログラミングせねばならず、手続き型言語に対する優位性は全くないのである。このように、ホーン節のプログラムの解釈に固執している限りは、論理型言語は消えていかざるを得ず、すべてを手続き型言語に頼るしかない。

2. 研究の目的

本研究では、高階述語論理記述を推論するために、分散配置されたハードウェアが協調する方法を明らかにする。

論理式の書き換えにより推論を行うのが、論理学の基本である。その基本に立ち返った自動推論手法として、(関数型言語で成功を取めている)リダクションマシンが提案されたことがある。しかし、記憶上に展開された論理式を中央処理装置で書き換える構成だったため、効率が上がらず、分散環境に最も適さない手法とされた。現在の高速ネットワークには、パケットのスイッチが多数配置され、パケットを目的地に配送している。高階の述

語論理式を規則で書き換える機構を実現するのに、分散配置されたスイッチと状態記憶を用いることを提案する。その上で(メタ)規則を記述することで、各種の論理や代数の計算が行える。エキスパートシステムで用いられたプロダクションシステムと似て非なる手法であり、作業記憶の分散配置と(メタ)規則の自動最適化の導入により、分散システムに適した手法を目指す。

分散配置されたハードウェアのネットワーク全体で、高階の述語論理の推論を行う方法を提案する。高階の述語論理式を両辺に持つ規則で書き換える機構を実現するのに、計算ノード上にスイッチ、状態記憶と演算回路を配置する。規則中のリテラル L_i , R_i が、「(引数 1, ..., 引数 p)」と記述されるとする。通常、引数 1 に述語名を書くが、変数を置くことで高階の柔軟な処理をする。ルールの形式は、「 $L_1, \dots, L_m :- R_1, \dots, R_n.$ 」とする。この形の規則を注意深く記述することで、各種の論理や代数の計算が行える。エキスパートシステムで用いられたプロダクションシステムに似ているが、作業記憶を分散配置することで、分散システムにも適した方法となる。

3. 研究の方法

人工知能の研究では、研究の進展に応じて、対象となる知能が扱う対象が拡張され、それに伴って、様々な知能像が追求されてきた。1950 年代に研究が開始されたが、1960 年代には主としてパズルやゲームが対象とされ、知能の本質は探索であるとされた。推論機構の基礎となる融合原理 (resolution principle) が提案されたのも、この頃である。1970 年代に入ると、計算機の能力の向上も相俟って、探索や推論を種々の分野に適用することが可能となり、計算機の内部に対象分野ごとの知識を構築することが試みられた。知識工学が体系化され、知識を格納するための器となる種々の知識表現が提案され、1980 年代には知識工学の技術を実用化するための企業が設立されるようになる。計算機科学の観点では、知識表現とは従来の手続き型の高級プログラミング言語をさらに高級化したものである。高級化の一つの宣言的プログラミングでは、各々の場面で計算機の動作を指定しなくても、一つの知識で複数の局面に対応させることが可能な技術とされた。一般的な知識をたとえば述語論理などで記述することで、局面に応じた複数の手続きを自動的に生成する。知識表現は知能の内部に存在し、外界の事物に対応づけられるとされた。ところが、実際に知識表現を備えた専門家システムを開発すると、想定した外界は変化し続け、知識表現内のデータだけではなく、知識表現も常に改訂を続ける必要が生じ、その手間は膨大なものになった。Winograd と Flores [1986] は、その理由を哲学で研究さ

れた現象学にまでさかのぼって論じた。外界とは客観的なものではなく、間主観的なものである。人々が言葉を交わしている間に、辻褃の合った事柄が外界に存在しているという信憑が、人々の間に生じ、それが広がって、社会的に定着したものが知識と呼ばれているに過ぎない。そのため、人々から主観的に見れば、外界は動的に変化し続けるもので、対応する知識も個人、小さなグループ、専門家のみで通用する信憑から、社会的に定着した信憑まで、様々な段階がある。客観的と思っていた「知識」は、実は主観的な共感の輪なのである。西条[2005]は、そうした様々な信憑を許容しつつ、人間科学を再構築することを提案しており、人工知能の研究者にとっても興味深い。一方、従来の知識表現と専門家システムは、様々な信憑を複数保持して、適切に扱えるようにはなっておらず、結果として杓子定規で脆いものとなった。それが人工知能の限界となったのである。

この限界を突破するには、唯一無二の知識表現を知能の中に配置するのではなく、たとえば、複数のエージェント間で、信憑の候補をやりとりしながら、間主観的な信憑として動的に知識を構築する必要がある。そうした構成を取るマルチエージェントシステムは存在しており、個々にアドホックに作成されている。セマンティックウェブでは、サイト間でタグ付き記述をやりとりしている。どちらも、プロトコルとその解釈には柔軟性が必要である。シンボルは、各エージェントが経験してきた現象に結びついている。しかし、外界に対応物(状況理論でいう「錨(anchor)」)があるというのは、信憑に過ぎない。そのようなマルチエージェントシステムやウェブを形式化する論理が提案されているが、分散したシステムで論理的推論を実行するための手法がない。複雑な記述のデバックができず、記述は絵に描いた餅となっている。

以上の状況を取り扱うため、本研究では、論理的な記述の分散推論手法を提案する。これまでの論理プログラミングでは、ホーン論理の推論過程を、単一プロセッサによる手続き実行過程と見なしていた。このパラダイムから脱して、推論を情報の流れと見なす。その流れを(パケット)スイッチで制御する分散推論エンジンを構築する。そのプログラマからは、計算が項の書き換えにより行われているように見え、書き換えの優先度が情報の流れの優先度として、制御される。

4. 研究成果

計算ノードをパケットスイッチと単純なハードウェアで構成し、「1アーク書き換え」をメッセージのやりとりだけで、行う手法を研究した。

本手法の節は、ホーン節に限らないので、両辺に任意の高階述語構造が記述できる。たとえば、自然演繹の規則を節で記述すれば、

自然演繹が実現できる。種々の論理による推論も、その推論規則を節で記述することで行える。論理型言語ではメタインタプリタが多用されるが、本手法では、節の両辺に任意の高階述語構造が記述できることから、その利用範囲は遙かに広がる。メタインタプリタの利用は、解釈実行系に負担をかけるため、動作速度が遅くなるのが普通である。一方、David A. Turner のコンビネータによる関数型言語の書き換え系によるインタプリタには、プログラムが自動的に最適化される性質があり、「自己最適化性 (self-optimizing property)」と呼ばれている。これはメタインタプリタを実現するのに、適した性質で、メタ規則を解釈実行するためのオーバーヘッドを解消できる。本手法でも書き換え系を用いていることから、自己最適化性を持っている。このような自己最適化性が生じるのかを調査した。

人の推論は神経のネットワークで行われている。神経のネットワークが言語の記号処理を行っていることになり、本研究の提案とのアナロジーが考察できる。人の推論は、最初のうちは意識的で、ごちなく、効率が悪い。何度も似たような推論を繰り返しているうちに、神経ネットワークのトポロジーが変化し、スムーズな処理が行えるようになる。本研究の機構でも、最初のネットワーク上で解釈実行をすると、ハードウェアのネットワークとシミュレートしているネットワークの間の構造が乖離し、動作効率は低くなる。そこで、ハードウェアのネットワークを処理対象のネットワークに合わせて再構築し、適切なトポロジーのネットワークを構築する手法を検討する。現在の FPGA の多くは動作中にも再構成可能であり、そこから「再構成可能計算 (reconfigurable computing)」という考え方も生まれている。それを拠り所に、FPGA 上のネットワークの再構築についての考察を進めた。申請者の所属する大阪大学産業科学研究所では、ベルギーのルーベンカトリック大学が運営する imec (Interuniversity Microelectronics Centre) と共同で、次世代エレクトロニクス技術の開発を進めている。それとは、本研究は興味レベルがかなり異なり、具体的な実現ができていない。imec では、脳波計やネズミの脳に埋め込むセンサも開発し、実際にデータを取っているため、脳内のセンサネットワークを用いた推論との比較を行うことができた。

純粋な論理推論だけでは、実問題を解決することはできず、何らかの方法で推論の制御が必要である。節の組合せに重みを導入し、推論を調整することが重要である。その手法を考察し、確率プログラミング、確率推論や機械学習の成果の導入を検討した。規則や論理記述の書き換えなどの操作を重みの調整により、行う手法についても考察する。機械学習手法の一つである「帰納論理プログラミング

ング」分野にも、本手法により新しいパラダイムを提供することを試みた。

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 7 件)

Masayuki Numao, Distribute Inference to Support Inter-subjective Empathic Computing, Theory and Practice of Computation, 査読有, 3, 246-252, 2014.

Danaipat Sodkomkham, Roberto Legaspi, Ken-ichi Fukui, Koichi Moriyama, Satoshi Kurihara, and Masayuki Numao, Predictability Analysis of Aperiodic and Periodic Model for Long-Term Human Mobility Using Ambient Sensors, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 査読有, 8940, 131-149, 2015.

Nattapong Thammasan, Koichi Moriyama, Ken-ichi Fukui, and Masayuki Numao, Familiarity effects in EEG-based emotion recognition, Brain Informatics, 査読有, 4, 1-12, 2016

Nattapong Thammasan, Koichi Moriyama, Ken-ichi Fukui, and Masayuki Numao, Continuous Music-emotion Recognition Based on Electroencephalogram, IEICE Transactions, 査読有, 94, 1234-1241, 2016.

Danaipat Sodkomkham, Davide Ciliberti, Matthew A. Wilson, Ken-ichi Fukui, Koichi Moriyama, Masayuki Numao, and Fabian Kloosterman, Kernel density compression for real-time Bayesian encoding/decoding of unsorted hippocampal spikes, Knowledge-Based Systems, 94, 1-12, 2016.

Nattapong Thammasan, Ken-ichi Fukui, and Masayuki Numao, Application of Deep Belief Networks in EEG-Based Dynamic Music-emotion Recognition, Proc. IJCNN 2016, 881-888.

Wataru Fujita, Koichi Moriyama, Ken-ichi Fukui, and Masayuki Numao, Two-Stage Reinforcement Learning Algorithm for Quick Cooperation in Repeated Games, Transactions on Computational Collective Intelligence, 査読有, 2017, 1-10.

[学会発表] (計 5 件)

Nirattaya Khamsemanan, Cholwich Nattee,

and Masayuki Numao, A First-Order Logic Representation Based Distance Function, Proc. 24th International Conference on Inductive Logic Programming, Nancy, France, 2014.

Nirattaya Khamsemanan, Cholwich Nattee, and Masayuki Numao, Visualizations of First-Order Logic Representation Based Dataset, Proc. 24th International Conference on Inductive Logic Programming, Nancy, France, 2014.

Nirattaya Khamsemanan, Cholwich Nattee, and Masayuki Numao, Distance based Kernels for First-Order Logic Data, Proc. 25th International Conference on Inductive Logic Programming (ILP 2015), Kyoto, Japan. 2015.

Nirattaya Khamsemanan, Cholwich Nattee, and Masayuki Numao, Distance-based Evaluation Function for First-order Rule Construction, Proc. 26th International Conference on Inductive Logic Programming (ILP 2016), London, UK. 2016.

Sirawit Sopchoke, Ken-ichi Fukui, Masayuki Numao, Beyond Similarity: Serendipitous Music Recommender Systems, 人工知能学会全国大会, 小倉, 2016.

[図書] (計 3 件)

Shin-ya Nishizaki, Masayuki Numao, Jaime D. L. Caro, Merlin Teodosia C. Suarez, Theory and Practice of Computation, World Scientific, 2014.

Shin-ya Nishizaki, Masayuki Numao, Jaime D. L. Caro, Merlin Teodosia C. Suarez, Theory and Practice of Computation, World Scientific, 2015.

Shin-ya Nishizaki, Masayuki Numao, Jaime D. L. Caro, Merlin Teodosia C. Suarez, Theory and Practice of Computation, World Scientific, 2016.

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沼尾 正行 (NUMAO, Masayuki)
大阪大学・産業科学研究所・教授
研究者番号：30198551

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()