

シミュレーテッド分岐マシンによって合理的な判断を行うリアルタイムシステム

Real-Time Systems Capable of Performing Rational Evaluations by Utilizing Simulated Bifurcation Machine

辰村 光介 TATSUMURA Kosuke 濱川 洋平 HAMAKAWA Yohei 山崎 雅也 YAMASAKI Masaya

リアルタイムシステムは、金融・車載・通信などの分野において、時々刻々と変化する状況を分析し、その状況への応答行動を即時に実行する。従来の高速リアルタイムシステムは、その時間的制約のために単純な判定により応答を決定することも多い。

東芝グループは、量子インスパイアード組み合わせ最適化計算機であるシミュレーテッド分岐マシン(Simulated Bifurcation Machine, SBMと略記)を開発した。これは、決定論的な応答時間を持ち、エッジシステムへの組み込みが可能であるといったリアルタイムシステムに必要な特長を併せ持つことから、組み合わせ最適化に基づいた、より合理的な判断を行う高速リアルタイムシステムの実現を可能とする。このような新しいリアルタイムシステムに関する、様々な技術実証を行っている。

Real-time systems capable of analyzing continuously changing situations and responding to these situations in real time are commonly used in such fields as finance, on-board automotive equipment, and communications. Conventional high-speed real-time systems tend to determine responses in a simple manner due to their time constraints.

The Toshiba Group has developed the Simulated Bifurcation Machine (SBM), a quantum-inspired combinatorial optimization solver that possesses features necessary for real-time systems including deterministic response time and embeddability in edge systems. These features make it possible to realize high-speed real-time systems capable of performing more rational evaluations than current systems, based on combinatorial optimization. We are now conducting various technical demonstrations applying the SBM toward the realization of such systems.

1. まえがき

リアルタイムシステムとは、決められた時間までに処理を完了しなければならないという時間的制約のあるシステムをいう。リアルタイムシステムの多くは、過去の蓄積された情報を処理するのではなく、現在の刻々と変化する状況を把握してそれに応じた応答行動を決定し、現場で即時に実行する。金融分野における自動取引システムや、近年の自動車・ロボットのような自律制御機能を持つ移動体システム、多数ユーザーへの動的な資源割り当てを行う通信システムなどは、いずれもリアルタイムシステムの典型的な例である。

その時点の状況に応じた最適な応答を選択する問題は、しばしば組み合わせ最適化として定式化できる。ここで、組み合わせ最適化とは、複数の離散変数によって系の状態が記述され、その変数を引数とするコスト関数が定義される場合に、そのコスト関数を最小化する変数の組み合わせ(一つの状態)を見付けることである。そして、この最適解に基づく意思決定は、合理的な判断と見なせる。離散変数の数が増えるほど、解として取り得る状態の数は指数関数的に増大する(組み合わせ爆発)。全ての解候補から最適一つの解を選ぶという組み合わせ最適化は計算困難な問題とし

て知られ、大規模な組み合わせ最適化を短時間に実行することは、いまだチャレンジングな課題である。従来の高速なリアルタイムシステムは、単純な条件判定に基づいて応答を決定することも多い。

2011年に論文が発表されたD-Wave Systems社の量子アニーラー⁽¹⁾は、イジングマシンと呼ばれるタイプの組み合わせ最適化問題を高速に解く専用計算機であり、初の商用量子コンピューターとしても大きな注目を集めた。その後、量子原理若しくは量子原理に着想を得た原理に基づく(量子インスパイアード)、多様なイジングマシンが提案・実証されている⁽²⁾。東芝グループによって開発されたSBMは、高速・大規模かつ実用性の高い量子インスパイアードイジングマシンである⁽³⁾⁻⁽⁸⁾。SBMは、東芝グループ独自の分岐現象に基づく量子断熱最適化手法を元に、その古典対応版として発見された新しい原理で解を探索する^{(3), (4)}。

SBMは、特に専用デジタル回路として実装される場合⁽⁵⁾、(1)求解が短時間かつ決定論的(固定)、(2)エッジシステムに組み込み可能、(3)用途に合わせた入出力部と直接結合可能、といった特長を併せ持つ。これらの特長は、いずれも、システム全体の応答時間に制約があるリアルタイムシステムの構成モジュールに対して求められる要件である。した

がって、SBMは、組み合わせ最適化に基づき最適な応答行動を決定する高速リアルタイムシステムを実現する可能性を持っている。

ここでは、SBMのリアルタイムシステム適合性を整理し、金融取引システムを含む複数の技術実証事例を通じて、SBMの組み込みによって実現されるリアルタイム最適応答システムについて述べる。

2. リアルタイムシステムへの適合性

東芝グループは、SBMのサービスとして、エッジシステム向けの組み込み型とクラウドシステム向けのWebアクセス型の両方を展開している⁽⁶⁾。ここでは、前者のリアルタイムシステムへの適合性について整理する。

2.1 決定論的応答時間

SBMは、解くべき問題に対応する相互作用を持つ多体スピンの分岐現象を含む時間発展過程をシミュレートすることで、膨大な解候補の中からコスト関数が最小となる解（厳密解）若しくはそれに近い良解を見つけ出す（図1）。分岐現象が完了するまでの過程を何回の時間発展ステップでシミュレートするかは、用途に応じて事前に決定できる。このため、運用の段階では1回の求解に必要な演算量は変動しない。

SBMのアルゴリズムは、同時に実行可能な演算を豊富に含み、計算並列度が高いので、多数の演算器を含む専用の並列処理回路（図2）として実装することで、1回の求解の時間を極めて短くできる⁽⁵⁾。専用回路実装（ハードウェア処理）のもう一つの特長は、ソフトウェア処理の場合と異なり、あらゆる割り込み処理が発生しないため、求解の時間が、“決められた回数のクロックサイクル”という単位で厳密に固定されることである。

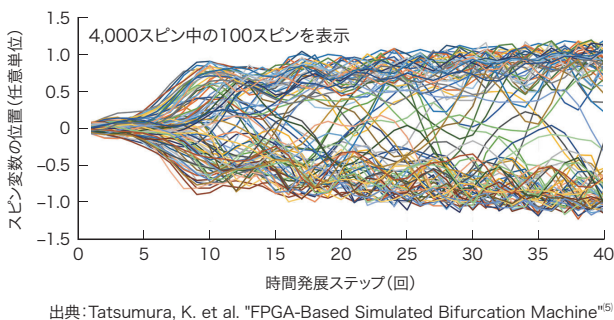


図1. SBMの解の探索過程

振動子（スピン変数）ネットワークの分岐を伴う時間発展過程をシミュレートする。解くべき問題は、振動子間相互作用として表現される。

Solution-search process of SBM: Time evolution of Ising spin variables

2.2 エッジシステムへの組み込み

冷却器やレーザーといった特殊な付帯装置を必要とするイジングマシンとは異なり、SBMは、通常（標準電源・室温動作）のデジタル回路としてエッジシステムの中に組み込むことが可能である（図3）。リアルタイムシステムの応答時間は、各モジュールの処理時間とモジュール間通信遅延の総和であるが、エッジ組み込み形態にすることで、インターネットの通信遅延を排除できる。また、SBMは、固定設置型システムだけでなく、移動体システムにも組み込める。

2.3 用途に合わせたインターフェース

リアルタイムシステムで状況の把握・応答の判断・実行を密に連動させるには、内部モジュールの相互接続インターフェースが重要となる。相互接続インターフェースは、低遅延・広帯域であることに加え、用途に応じてカスタマイズできるよう柔軟であることが望ましい。リアルタイムシステムは、一般に汎用ではなく、特定の用途を持つ。イジングマシンは、組み合わせ最適化問題全般を扱える汎用性を備え

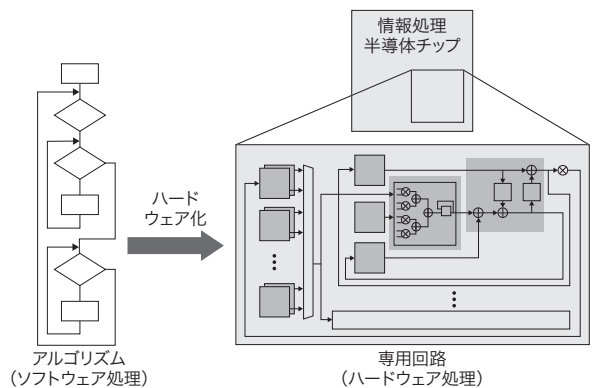


図2. アルゴリズムの専用回路化

計算の手続き（アルゴリズム）は、演算器とメモリの相互接続配線（専用回路）として表現できる。

Implementation of algorithm as custom circuit

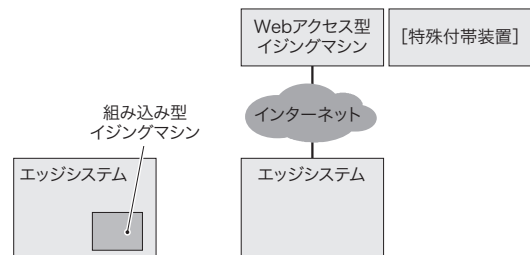


図3. 組み込み型とWebアクセス型のイジングマシン

イジングマシンは、エッジシステムからのアクセス形態の違いによって2種に分類できる。

Embeddable and web-access type Ising machines

るが、用途が特定される場合、入出力を効率化するための工夫の余地が生じる。一方、SBMを専用回路として組み込む場合、用途に応じた最適なインターフェース回路を設計・実装できる。インターフェースの最適化は、FPGA (Field Programmable Gate Array) など製造後に再構成可能な半導体処理チップを採用する場合に特に容易である。

3. 技術実証の事例

SBMのリアルタイムシステムへの適合性に関する技術実証の事例を三つ示す。

3.1 金融(為替)自動取引システム

刻々と変化する外国為替市場の情報を取り込み、組み込み型SBMを用いて組み合わせ最適化問題を解くことで、最良の裁定取引機会を検出し、その情報に基づき注文パケットを発行する自動取引システム(図4)を実証している⁽⁷⁾。

裁定取引とは、本質的に同じ資産の売りと買いを、二つの異なる状況で実行することで価格差に基づく利益を得ることをいう。その一例が通貨間裁定取引である。循環的な通貨の交換売買は、基本通貨において利益を生じさせ得る。そのような取引機会のライフタイムは通常短く、市場が変化する前に注文を発行する必要がある。通貨間交換レートをエッジに割り当てた重み付き有向グラフ(市場グラフ)における最適経路探索問題として定式化できる。これは、典型的な組み合わせ最適化であって、実証機のSBMは、この問題を解く。

実証機の、市場パケットの到着から注文パケットの発行までの応答時間は30 μ s程度である。その応答時間の変動は極めて小さく、決定論的である。8通貨15ペアの為替の実

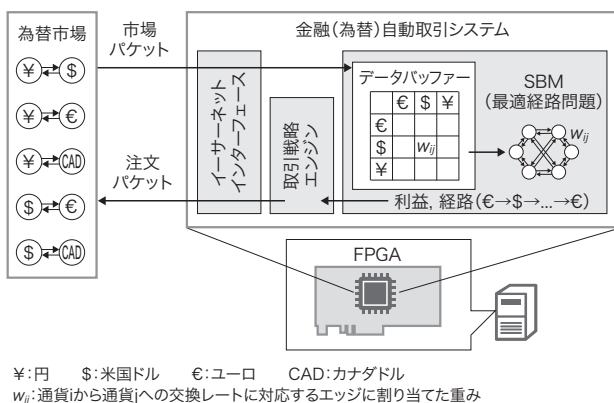


図4. 金融自動取引システムへの適用例 (為替裁定取引システム)

厳しい時間制約の中で、組み込み型SBMを用いて大規模組み合わせ最適化問題を解き、それに基づく取引判断で発注パケットを自動的に発行する。

Example of financial algorithmic trading (cross-currency arbitrage) system

取引データを用いた検証では、全ての取引機会の中から最も利益率が高いものを検出する確率は91% (少なくとも利益が出る取引経路を検出する確率は98%)であり、市場変化の前に注文を発行することが可能であった。

実証機の構成モジュールは、全て一つのFPGAチップに実装された。SBMの回路モジュールは、市場グラフを保持・更新するデータバッファ回路(前段)と専用インターフェースで結合され、市場グラフの全データを1クロックサイクルで取り込むことができる。また、SBMは、最終的な発注を判断する取引戦略エンジン回路(後段)とも密に結合された。汎用のモジュール間接続規格(バス規格など)は、1ms程度の遅延を持つことが多く、実証機で数十 μ s級の低遅延性能を実現するためには、専用の相互接続が必要であった。

3.2 自律制御移動体システム

移動体システムの自律制御機構は、一般に、センシング、状況認識、行動計画、制御の一連の動作を周期的に繰り返す(図5)。一連の動作の周期は、典型的には1s間に10回から数十回であることが多い。システム全体のスループットは、最も低速なモジュールに律速される。構成モジュールは、逐次データ(ストリームデータ)の入出力処理も滞留なく行いながら、要求されるスループットを実現する必要がある。

動画像における多体物体追跡をモチーフに、自律制御機構のモジュールとして組み込み型SBMを適用可能であることを実証している(図5)⁽⁸⁾。

多体物体追跡は、画像中の物体の認識(物体バウンダリーボックスの検出)と画像フレーム間の物体の対応付け(識別子割り当て)によって実現できる。後者は、フレーム間での物体バウンダリーボックスの重なり量を同一性の指標

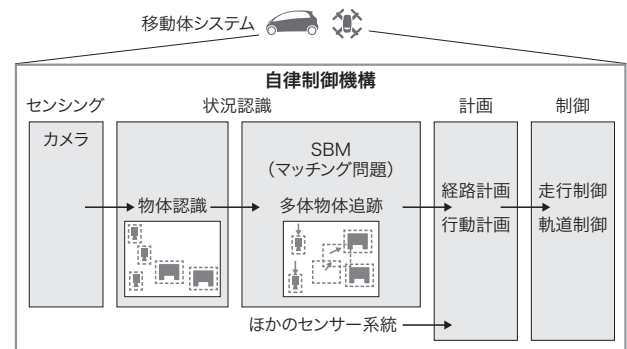


図5. 自律制御移動体システムへの適用例

自律制御機構の典型的なモジュール構成において、組み込み型SBMは、状況認識や行動計画のモジュールとして活用できる。

Example of mobile systems with autonomous control functions

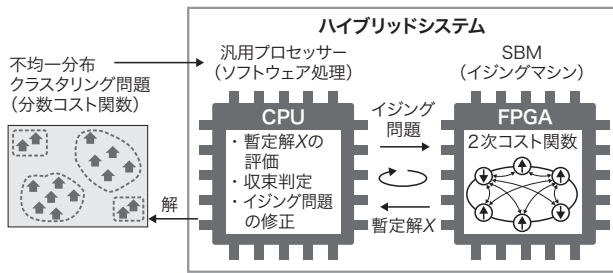


図6. 低遅延イジングマシンと汎用プロセッサを用いたハイブリッドシステム

SBMと汎用プロセッサとの通信遅延は小さく、様々な高性能ハイブリッドシステムを構築できる。

Hybrid system using both low-latency Ising machine and general-purpose processor

とする組み合わせ最適化(2部グラフ最大マッチング)として定式化できる⁽⁸⁾。実証機の組み込み型SBM(2,048スピンサイズ)は、1フレームごとに現フレーム(最大45物体)と過去フレーム(最大45物体)とのマッチング問題を解く。前後フレームのバウンダリーボックスからイジング形式の問題を生成する前段部、SBM、物体識別子付きの動画を生成する後段部の三つを含む実証システムで、毎秒30フレーム以上のスループットを実測した。このように、SBMは、1s間に数十回の応答行動を繰り返す自律制御機構に組み込むことが可能である。

3.3 ハイブリッドシステム

組み込み型SBMの低遅延特性を生かして、より高い機能を持つハイブリッドシステムを構築できることを実証している⁽⁹⁾。

不均一分布クラスタリングとは、自然なグループ分けにおいて、グループごとに要素数が大幅に異なるクラスタリング問題である。不均一分布クラスタリングは、イジング形式(2次コスト関数)よりも複雑なコスト関数(分数コスト関数)を持つ組み合わせ最適化として表現できる。実証したハイブリッドシステムでは、この問題をイジング問題の求解とそれ以外の処理の繰り返し手続きに帰着させて解く(図6)⁽⁹⁾。イジング問題の求解とそれ以外の処理は、それぞれイジングマシンと汎用プロセッサで実行する。両者を排他的に繰り返し実行する必要があるため、両者間の通信オーバーヘッドが問題になり得る。組み込み型SBMの通信オーバーヘッドは、計算時間と比較して小さく、不均一分布クラスタリングの求解時間全体を短縮できた⁽⁹⁾。

4. あとがき

SBMで、組み合わせ最適化に基づく合理的な判断を行う高速リアルタイムシステムを実現する可能性について述べた。

今後も、リアルタイムシステムにSBMを適用することで、既存のリアルタイムシステムの高品質化だけでなく、様々な分野で新たな価値の創造・共創に取り組んでいく。

文献

- (1) Johnson, M. W. et al. Quantum annealing with manufactured spins. Nature. 2011, **473**, p.194-198.
- (2) Mohseni, N. et al. Ising machines as hardware solvers of combinatorial optimization problems. Nature Reviews Physics. 2022, **4**, p.363-379.
- (3) Goto, H. et al. Combinatorial optimization by simulating adiabatic bifurcations in nonlinear Hamiltonian systems. Science Advances. 2019, **5**, 4, eaav2372.
- (4) Goto, H. et al. High-performance combinatorial optimization based on classical mechanics. Science Advances. 2021, **7**, 6, eabe7953.
- (5) Tatsumura, K. et al. "FPGA-Based Simulated Bifurcation Machine". 29th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL 2019). Barcelona, Spain, 2019-09, IEEE. 2019, p.59-66.
- (6) 東芝デジタルソリューションズ. "量子インスパイアード最適化ソリューション SQBM+™ A unique way to break the limits of the world.". SQBM+. <<https://www.global.toshiba/jp/products-solutions/ai-iot/sbm.html>>, (参照 2022-07-25).
- (7) Tatsumura, K. et al. "A Currency Arbitrage Machine Based on the Simulated Bifurcation Algorithm for Ultrafast Detection of Optimal Opportunity". 2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Virtual Conference, 2020-10, IEEE. 2020, p.3281-3285.
- (8) 濱川洋平, ほか. "疑似量子計算シミュレーテッド分岐アルゴリズムによるリアルタイム組合せ最適化システム". マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO 2022)シンポジウム論文集, オンライン, 2022-07, 情報処理学会, 2022, p.1725-1732.
- (9) Matsumoto, N. et al. Distance-based clustering using QUBO formulations. Scientific Reports. 2022, **12**, 2669.



辰村 光介 TATSUMURA Kosuke, Ph.D.
研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所
コンピュータ&ネットワークシステムラボラトリー
博士(工学) IEEE・電子情報通信学会会員
Computer and Network Systems Lab.



濱川 洋平 HAMAKAWA Yohei
研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所
コンピュータ&ネットワークシステムラボラトリー
Computer and Network Systems Lab.



山崎 雅也 YAMASAKI Masaya
研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所
コンピュータ&ネットワークシステムラボラトリー
Computer and Network Systems Lab.