

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K11285

研究課題名（和文）Approximateネットワークによる高速性と計算精度の自動チューニング基盤

研究課題名（英文）Performance and Accuracy Optimization Framework for High-Bandwidth Low-Latency Approximate Interconnection Networks

研究代表者

平澤 将一（Hirasawa, Shoichi）

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・特任助教

研究者番号：30436737

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ノイズ耐性の低い多値変調を用いることで広帯域を実現し、かつビット化けをあえて訂正しないことで低遅延を達成するApproximateネットワークのアプリケーション最適化基盤を探索した。  
具体的には、Approximateネットワークを用いて並列アプリケーションを実行する環境において、正しく動作することを保証した上で高速に実行できるパラメータセットを発見する自動チューニング手法を提案した。また浮動小数点数のデータ値を考慮する並列アプリケーションの通信精度自動チューニング手法を提案し、評価結果より並列アプリケーションに対して平均43%の性能向上を達成することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ノイズ耐性の低い多値変調を用いることで広帯域を実現し、かつ、ビット化けを訂正せずに放置することで低遅延を達成するApproximateネットワークは極めて高性能であるが、アプリケーション開発者が長大な時間をかけて最適パラメータ値を手動で探索しており、一般利用の障壁が高い。  
そこで本研究でApproximateネットワークにおいて高速に実行できる適切なパラメータ値を自動的に発見する自動チューニング基盤を開発することにより、ネットワークを含めたApproximate Computingを一般ユーザが利用できるように開放することができた。

研究成果の概要（英文）：To resolve the next generation interconnection networks latency problem, our prior work has presented error-prone high-bandwidth low-latency networks that do not use the FEC operation.

In this study, we apply performance and accuracy optimization tuning method for approximate interconnection networks; it automatically executes applications multiple times to identify whether each communication should be approximate or accurate data transfer.

Application performance evaluation shows that it achieves a 43% average execution performance improvement for parallel applications.

研究分野：計算機科学

キーワード：Approximateネットワーク 自動チューニング手法 性能揺らぎ 浮動小数点数

## 1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの微細化と動作電圧が下がることにより、最近のスーパーコンピュータ(以後、スパコンと呼ぶ)から携帯端末の組込プロセッサに至る様々なコンピュータではビット化け対策が重要となってきている。ビット化けとは、ハードウェアの故障による恒久的な不具合ではなく、メモリに格納されているデータなどの一部のビットが反転(0<->1)し、それを原因に非決定的な不良が発生する不具合である。現在のスパコン、データセンターのコンピュータにはビット化けを検出訂正する様々な機構が搭載されているが、現実的なハードウェア/ソフトウェアコストで、この不良からの完璧な回復を保証することは難しい。つまり、アプリケーションの実行が異常にも関わらず異常終了せず、しかも、アプリケーションの計算結果が変造されてしまうサイレントエラーが起こりうる。

一方で、いくつかの並列計算ではビット化けへの耐性を持っている。つまりビット化けが生じても計算結果の大勢に影響せず十分な場合がある。この点に注目して、許容誤差を若干大きくすることで計算の精度を落とし消費電力を削減し、ハードウェアのスループットを向上させる Approximate Computing の研究が進んでいる。

ただし、Approximate ネットワークを活用した上で正しい計算結果を得るためには、アプリケーション側の対応が必要である。これまでの研究成果より、エラー耐性を持つ並列アプリケーションでは、ビット化けを許容できるプロセス間通信と、完璧なデータ転送が要求されるプロセス間通信があることが分かった。さらに、ビット化けを許容する通信でも、一部のビットについては完璧な転送が必要となる場合が多い。これは、IEEE754 浮動小数点数表現における符号部、指数部、仮数部の各ビット化けがもたらす数値誤差は均一ではないことに起因する。例えば、符号部にビット化けが生じた場合、値が反転するため、その数値の絶対値の 2 倍の誤差が生じることになる。一方、仮数部の下端ビットが反転した場合は極めて小さな値の誤差に留まる。

## 2. 研究の目的

本研究では、Approximate ネットワークを用いてアプリケーションを実行する環境において、正しく動作することを保証した上で高速に実行できるパラメータを発見する自動チューニング手法を提案し、性能評価を行う。

概要を図に示す。ネットワーク側では多値変調を想定する。重要なデータの通信とそうでない通信ごとにコーディングのシンボルマッピングを動的に変更する。つまり、通信帯域を大きくするためには多値変調が必要となるが、多値変調を行うとビットエラー率が悪くなる。2 値のみを用いて変調すると、ビットエラー率が大幅に改良されるが、通信帯域が小さくなってしまう。

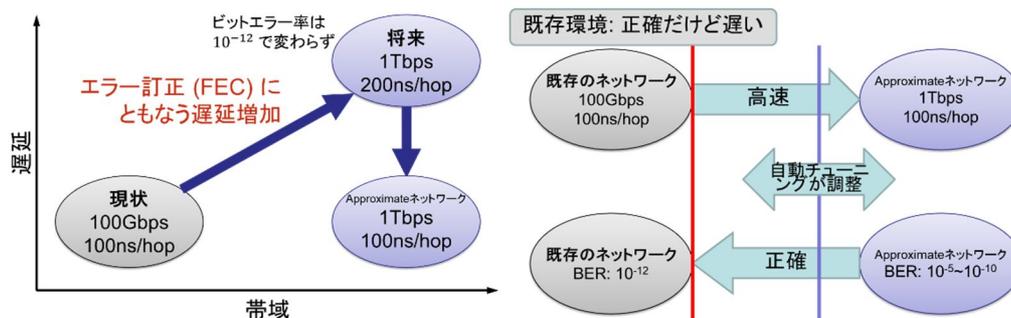


図: Approximate ネットワークの性質と自動チューニング

一方、アプリケーション側では重要なデータ通信と、そうでない場合を識別する必要がある。したがってネットワークとアプリケーションのコードesignが極めて重要であり、この点で本自動チューニング基盤が、アプリケーションの実行誤差を許容範囲内に抑えつつ、通信性能、ひいてはアプリケーションの実行性能を最大化する点で独自性を持つ。さらに、本自動チューニング基盤はネットワークのみならず、(誤りを生じうる)メモリやプロセッサにも適用可能である。現状 Approximate Computing における解の Verification は高度な理論的基盤に基づいて保証されているため、一般ユーザは高度な専門性が必要される。一方、本課題で開発する自動チューニング基盤はその利用に特別な専門性を必要としない。つまり、本研究は Approximate Computing を一般ユーザが利用できるように開放する点に独自性と創造性がある。

## 3. 研究の方法

### (1) 概要

Approximate ネットワークは、Approximate 通信の際に保護するビット数を設定可能である。

また、Approximate ネットワークを活用するアプリケーションは、ビット化けを許容する通信と、ビット化けを許容しない通信を指定可能である。

つまり、ビット化けを許容する通信が Approximate ネットワークにより高速に転送されることによりアプリケーションの高速化が期待できる。一方、多大なビットエラーにより求める解に収束しないことが起こりうる。

そこで、Approximate ネットワークにおける自動チューニングでは、Approximate ネットワークのパラメータであるビットマスクと、アプリケーションのパラメータであるビット化けを許容する通信の組み合わせ全体に対してチューニングする必要がある。さらに、既存の自動チューニング手法とは異なり、パラメータの組み合わせに対する試行において、性能だけではなく、アプリケーションが求める解で正しく実行を完了したことを確認する必要がある。

## (2) 自動チューニングの探索空間

Approximate ネットワークを利用するアプリケーションでは、並列実行を進めるためにプロセス間通信を行う。既存のアプリケーションは正確な通信を行うネットワークを前提としているため、Approximate ネットワークを活用しても正しく計算を完了することができるプロセス間通信を特定すること、あるいはそのようなプロセス間通信があった場合にどの程度正確な通信が必要であるか、通常事前には分からない。そこで、提案する自動チューニング手法を活用するために、アプリケーション中のプロセス間通信を、正確なプロセス間通信が必要な通信と、Approximate ネットワークを活用してビット化けを許容する通信に明示的に分類し、これを自動チューニングによって探索する。

Approximate ネットワークを活用するプロセス間通信が定義されたとしても、各データのどのビットまでは正確に送信する必要があり、どのビットからはビット化けを許容するか未知である。そこで、Approximate ネットワークを活用するプロセス間通信で許容するビット化けの数をパラメータ化し、自動チューニングによって探索する。

Approximate ネットワークでは、通信速度とエラー率のトレードオフが存在する。すなわち、許容するビット化けの頻度が低い(エラー率が低い)場合には必要なエラー補正が多くなり通信速度が低く、逆に許容するビット化けの頻度が高い(エラー率が高い)場合には必要なエラー補正が少ないため通信速度が高い。このトレードオフを静的に決定することは困難であるため、自動チューニングによって探索する。

これらのパラメータはそれぞれ従属関係にあるために独立して探索することは困難である。すなわち、アプリケーションが正しく動作するために許容できるプロセス間通信に依存して正確に送信する必要があるビット数が定まり、また同時にその組み合わせにおいてアプリケーションが正しく動く場合に最も高速となるエラー率と速度のトレードオフポイントが定まる。したがって、提案する自動チューニング手法においては、これらのパラメータ全体が構成する空間を探索する。

## (3) 解の保証

自動チューニングにおいてアプリケーションのあるパラメータセットに対する試行の終了後に、正しい解が出力されたかどうかを確認する。解の正しさは一般には定義できないが、アプリケーション側で正しさを評価する方法やコードが提供されている場合、またアプリケーションのユーザが固有の正しさを定義することが可能である。

提案する自動チューニング手法においては、試行するアプリケーションの実行終了後に正しい解が出力されたか確認する手段があらかじめ提供されていることを前提とする。これは、アプリケーション自体が正しさを確認して結果を出力するコードを含む場合および、アプリケーションとは独立に、アプリケーションの出力を入力として、正しさを確認した上でその確認結果を出力するコードが提供されている場合のいずれも含む。

アプリケーションの実行が終了して正しくない解が出力された場合には直ちにその結果が確認可能であり、対応するパラメータセットは自動チューニングの結果として選択されない。

## (4) 探索手法

アプリケーションと Approximate ネットワークのパラメータを独立した次元として構成した探索空間は広大であり、全体をくまなく探索することは現実的な時間では不可能である。したがって提案する自動チューニング手法では、Approximate ネットワークを用いてビット化けが起こった場合にアプリケーションの正しくない実行結果が出力されることと、それを確認して検出可能である性質を利用して探索空間を大幅に狭める。つまり、正しくない実行結果が出力された場合に、それに至るパラメータセットの近くを探索しないような探索を行う。

具体的には、アプリケーション中のプロセス間通信に注目し、特定のプロセス間通信において Approximate ネットワークを利用した場合に起きたビット化けに対して正しくない実行結果が出力された場合にはペナルティを課し、そのプロセス間通信に対応する探索空間での探索数を少なくする。逆に、特定のプロセス間通信において Approximate ネットワークを利用した場合に

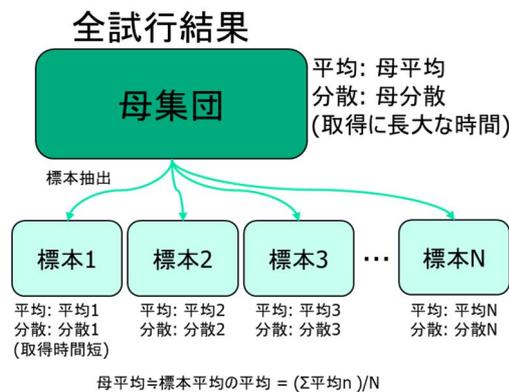
起きたビット化けに対して正しい実行結果が出力された場合には、そのプロセス間通信に対応する探索空間での探索数を多くする。

これにより、正しくない解に至ったパラメータセット近辺の探索よりも他のパラメータセットの探索を優先させ、探索に要する時間を低減する。また、記録してある各実行時間より標準偏差を求め、ユーザが指定する信頼区間内にチューニング結果が収まることを確認できた場合に探索を終了する。

#### (5) 試行性能の揺らぎに対応する動的最適化基盤

各試行には一般に性能揺らぎがあり、揺らぎを含む試行性能を使用してチューニング結果を決定すると、チューニング結果にも揺らぎが発生する。ここから必然的に、本来求めたい最適なパラメータセットを発見できない恐れが発生する。

各パラメータセットの最適化を可能な限り正確に行うためには、正確な試行結果が必要である。しかしながら正確な母集団の試行結果の平均を取得するためには、理論的には無限回の試行が必要となる。これは現実的な時間内に最適化を完了させる必要があることから非現実的である。したがって、提案する動的最適化基盤ではまず、図のように一定数の試行を行うことで標本平均を取得する。取得した標本平均を用いて、ここから母平均を予測する区間推定を用いる。

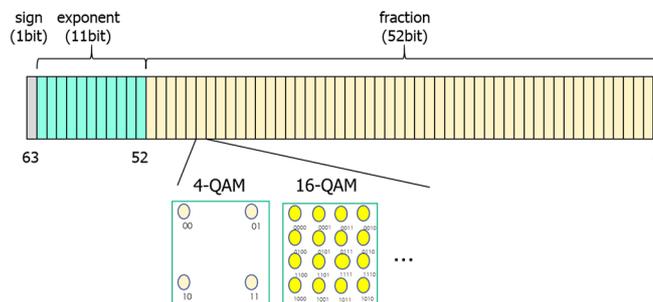


母平均の予測を行うために一定回数の試行を行って取得した標本の平均と分散を用いて、あるパラメータセットによる実行性能の母平均を含むと予想される信頼区間を計算可能である。そこで、2 個のパラメータセットによる実行性能の比較には取得した標本値ではなく、複数回試行することで計算された信頼区間同士を用いる。

指定された最大試行回数未滿で試行を繰り返すことで信頼区間を狭めることが可能である。信頼区間を狭めるために試行回数を増加させることで信頼区間の大小関係を決定できることが期待できるが、一方で試行回数が増加することで最適化に要する総実行関係が増加する問題が生じる。つまり、信頼区間の幅を広く設定すると性能比較が同一と誤判定される可能性が増加し、一方で性能比較に有意差が存在することを確認するためには試行回数を増加させる必要があり、トレードオフの関係ある。

#### (6) 浮動小数点数と通信変調方式

IEEE754 規格で規定された倍精度浮動小数点数(64bit)を Approximate ネットワークで転送する場合、図のように各ビットで異なる変調方式を使用することが可能であり、通信エラー率とビット化けによる誤差値の大小のトレードオフが発生する。



仮数部の LSB にビット化け (反転) が発生した場合は、仮数部の MSB にビット化けが発生した場合と比較して絶対値として小さい誤差しか発生しない。この性質に着目し、倍精度浮動小数点数の値に応じてエラー率が異なる変調方式を選択する。このような通信精度自動チューニング手法を用いることで、アプリケーションの実行に可能な限り影響を与えずに、Approximate ネットワークの持つ最大限のバンド幅を引き出す通信変調方式を選択する。

## (7) 並列アプリケーションの実行性能向上

選択した通信変調方式を使用して、倍精度浮動小数点数を使用する並列アプリケーションを実行する。多値変調を使用した場合に高い通信バンド幅を達成できる Approximate ネットワークの通信性能により、並列アプリケーションの実行性能向上が期待できる。

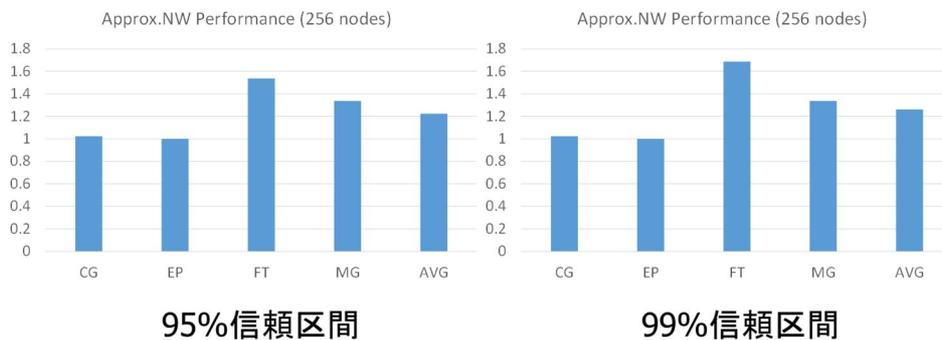
一方で、多値変調を使用した場合に高い確率で発生する通信エラーにより、並列アプリケーションの実行が失敗する可能性が発生するため、選択した通信変調方式ごとの並列アプリケーションの実行性能と実行成功率を乗じた期待値を評価関数として、並列アプリケーション実行のための通信変調方式を自動的にチューニングする。

これにより、Approximate ネットワークの持つ高い通信バンド幅を生かした高速な並列アプリケーションの実行と成功率を考慮する最大の実行性能期待値を達成する通信変調方式を自動的にチューニング可能となる。

## 4. 研究成果

### (1) 信頼区間を用いた場合の動的最適化

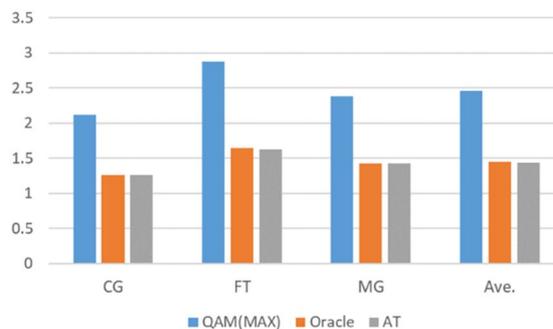
95% 信頼区間および 99% 信頼区間を用いた場合の動的最適化による実行性能を評価する。評価結果をそれぞれ図に示す。



すべてのベンチマークプログラムに対して、性能向上しているか、あるいは少なくとも性能低下していないことがわかった。特に FT および MG については 20%以上の性能向上率を得ることができ、95%信頼区間を用いた場合に平均で約 22%、99%信頼区間を用いた場合に平均で約 26%の性能向上率が得られた。

### (2) 通信精度自動チューニング手法

通信精度自動チューニング手法により各アプリケーションの相対実行性能を評価した。



図においては、各アプリケーションごとの最大バンド幅時の相対実行性能 QAM(MAX)、通信精度自動チューニング手法を使用した場合の相対期待実行性能 AT、および最大となる相対期待実行性能 Oracle を示す。

ここから、CG および MG においては提案する通信精度自動チューニング手法により Oracle と同等の相対期待実行性能を示していることがわかる。また、FT においても Oracle の 97%以上となる相対期待実行性能を示していることがわかる。

使用したアプリケーションの幾何平均において相対期待実行性能を 43%向上できている。このことから、通信精度自動チューニング手法の有効性が示された。また、平均して QAM(MAX)の 59%程度の相対期待実行性能を発揮しており、提案手法によりアプリケーションの実行成功を担保した上で Approximate ネットワークのもつ高い QAM(MAX)のバンド幅性能を活用できていることがわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平澤将一, 鯉淵道紘
2. 発表標題 Approximateネットワークの性能揺らぎに対応する動的最適化
3. 学会等名 組込み技術とネットワークに関するワークショップ ETNET2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平澤将一, 鯉淵道紘
2. 発表標題 Approximateネットワークに対する動的最適化基盤
3. 学会等名 組込み技術とネットワークに関するワークショップ ETNET2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平澤将一, 鯉淵道紘
2. 発表標題 Approximateネットワークに対する高速性と計算精度の最適化基盤
3. 学会等名 情報処理学会 研究報告システムソフトウェアとオペレーティング・システム (OS)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平澤将一, 鯉淵道紘
2. 発表標題 並列アプリケーションにおける実行性能向上のための通信精度自動チューニング
3. 学会等名 組込み技術とネットワークに関するワークショップ ETNET2024
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------