

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：32692

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700053

研究課題名(和文) 複雑領域に対する陰関数ベース高速メッシュレス解析システムの開発

研究課題名(英文) Development of Fast Meshless Analysis System Based on Implicit Function for Complex Shaped Domains

研究代表者

伊東 拓 (ITO, Taku)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・助教

研究者番号：80433853

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、高速に関数値計算可能な陰関数生成法を確立し、同法を用いて、複雑領域に対する高速メッシュレス解析システムを開発することである。研究成果は、まず、従来のB-Splineを用いた陰関数生成法を改良し、同法で必要な処理の1つを排除することで、陰関数生成に要する時間を最大12.7倍高速化した。また、メッシュレス解析システムの開発のために、まず、連立1次方程式の解法の高速化に取り組み、MICでの並列化で約3倍高速化された。また、メッシュレス法による電磁波伝搬解析をMTDMで行い、時間発展計算が、CPUでのSerial実行と比較して、GPUでは約8.3倍、MICでは約8.16倍高速化された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a fast meshless analysis system based on an implicit function. To this end, an implicit function that can execute fast evaluation of function values has been developed. Computation time for generating the implicit function is about 12.7 times faster than that of conventional one based on the B-Spline. In addition, to solve linear systems obtained by meshless methods, a parallel algorithm for iterative methods on many integrated core (MIC) architectures has been developed, and the computation time for solving the linear system using the parallel algorithm is about 3 times faster than that of serial execution on CPU. Furthermore, parallel algorithms of electromagnetic wave propagation simulations using meshless time-domain method (MTDM) on GPU/MIC have been developed. By using the parallel algorithms, the computation times of the simulation on GPU and MIC are about 8.3 and 8.16 times faster than those of serial execution on CPU, respectively.

研究分野：数値解析，コンピュータグラフィクス

キーワード：ハイパフォーマンス・コンピューティング GPGPU メッシュレス法 陰関数曲面 B-Spline Many Integrated Core

1. 研究開始当初の背景

有限要素法(FEM)や境界要素法(BEM)では、予め領域や境界を要素の集合で近似する必要がある。一方、近年考案されたメッシュレス法では、節点座標のみから形状関数を生成可能であり、FEMやBEMで生じていた要素生成を必要としない。ただし、メッシュレス法においても、解析対象領域の定義は何らかの形で必要となり、しばしば陰関数曲面によって解析対象の境界形状が表される。

陰関数曲面とは、陰関数 $f(\mathbf{x})$ の零等値面： $f(\mathbf{x}) = 0$ によって表される曲面であり、陰関数の生成法は、従来コンピュータグラフィックス分野で研究されてきた。これまでの研究により、物体表面上に節点が配置されていれば、任意の物体を陰関数曲面として表せることが分かっている。したがって、メッシュレス法を実行するために配置した節点を利用すれば、陰関数曲面によって解析領域の境界形状を表すことが可能なのである。

陰関数ベースメッシュレス法による解析プロセスをまとめると、次のようになる。

- (1) 境界表面上の節点から陰関数 $f(\mathbf{x})$ を生成
 - (2) 解析領域内部に節点を配置
 - (3) 連立1次方程式の係数行列の要素を計算するための積分(以下、行列要素計算と略記)
 - (4) 構成された連立1次方程式からの求解
- 上記プロセス(1)で生成される陰関数 $f(\mathbf{x})$ は、 $f(\mathbf{x}) = 0$ が境界形状を表すだけでなく、プロセス(2)および(3)において役立つ。これは、一般に陰関数 $f(\mathbf{x})$ が領域の内部で $f(\mathbf{x}) < 0$ 、外部で $f(\mathbf{x}) > 0$ となる性質を持っていることに起因する。すなわち、プロセス(2)において、 $f(\mathbf{x})$ の符号に注意するだけで、複雑な領域であっても内部に節点を配置することは容易になる。同様に $f(\mathbf{x})$ の符号を利用して、プロセス(3)においても、積分点を領域内部のみに容易に配置できる。

一方、任意の境界表面上の大規模節点群から陰関数 $f(\mathbf{x})$ を生成する代表的な方法では、 $f(\mathbf{x})$ は局所的に定義される関数を重み関数によって結合した形で表される。その影響で、陰関数 $f(\mathbf{x})$ の関数値の計算には再帰処理が含まれ、計算コストは比較的大きくなる。すなわち、上述のプロセス(2)と(3)では関数値の計算は頻繁に現れるため、解析結果を得るまでに多くの計算時間が必要になってしまう。

このような背景から、陰関数を用いたメッシュレス法は非常に複雑な領域に対して適用されず、現時点では、簡単に陰関数として表すことが可能な球や楕円体領域への適用にとどまっている。さらに、3次元問題において、プロセス(3)と(4)の計算コストは高くなる。なぜならば、まず、プロセス(3)では領域積分の評価が必要になるからである。また、プロセス(4)では、疎行列ではあるが帯行列でない係数行列を持つ連立1次方程式を解く必要があり、係数行列のサイズが節点数に依存する関係で、3次元問題では大規模な連立1次方程式となるためである。すなわち、総じて

メッシュレス法は計算コストが高いというデメリットが目立ち、要素生成を必要としないという利点を生かしきれていなかった。

一方、近年 Graphics Processing Unit (GPU)の発展が著しく、その並列性能が魅力的であることから、一般的な数値計算にもGPUが用いられている。研究代表者は、GPUの並列性能を生かすことが出来れば、上述のメッシュレス法のデメリットを解消でき、複雑な領域へのメッシュレス法適用の道が開けると考えたが、そのためには陰関数の関数値計算に再帰処理が現れないようにする必要があることが判明した。なぜならば、まず、GPU環境でCUDA言語を使って実装する場合、再帰的な関数呼び出しが許されていないからである。また、前述の通り、プロセス(2)と(3)では陰関数の関数値計算が何度も現れることから、関数値計算が出来なければそもそも解析プロセスが進まず、プロセス(4)にも辿り着けないのである。すなわち、陰関数を利用すれば複雑な3次元領域を簡単に表すことが出来る一方で、陰関数自身がGPUによるメッシュレス法の高速化への道を閉ざしているのである。したがって、GPU環境に特化した新しい陰関数生成法が、複雑領域への高速メッシュレス法には必要になるのである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、GPU環境に特化した陰関数を生成することで、複雑領域で実用的な時間で解析を完了することの出来るメッシュレス解析システムを開発することである。この目的を達成するために、まず、次の3つの性質を備えた陰関数を生成するためのアルゴリズムを明らかにする。

- (1) 高速に関数値計算可能。
- (2) 関数値計算に再帰処理を含まない。
- (3) 高精度

これらの性質を備えていれば、メッシュレス法にとって都合の良い陰関数となる。特に、GPU環境での実装を念頭に置いているため、(1)と(2)の性質を備えるためのアルゴリズムの確立には力を入れる。

次に、生成された陰関数を用いて、プロセス(3)の行列要素計算の高速化アルゴリズムを明らかにする。行列要素計算のための積分は、陰関数がGPU環境に特化していれば、完全に独立な計算となるため、比較的簡単にGPU環境での並列化が可能であると予想している。また、プロセス(4)に対して、連立1次方程式の高速ソルバーの検討をする。3次元問題では連立1次方程式が大規模になるため、GPU環境で実装した前処理付き反復法を適用することを考えている。

一方、上述の方法とは別に、メッシュレス法の形状関数を利用して直接偏微分方程式を離散化するタイプの方法も存在する。本研究では、このタイプのメッシュレス法の高速化をすることも目的の1つである。特に、電磁波伝搬解析をメッシュレス法で行い、複雑

領域における解析を簡単にしつつ、高速化を目指す。

3. 研究の方法

(1) 高速に関数値計算可能な陰関数生成

最終的には GPU 環境で高速計算のできる陰関数生成をすることを目指す。まずは CPU 環境で開発を行い、そちらが完成してから GPU 環境に移植する。陰関数生成法としては、B-Spline を利用した方法を改良することを考える。

(2) メッシュレス解析システムの開発

実用的なシステムを開発するためには、主にメッシュレス法を高速化することが重要になる。本研究では、大きく分けて2種類のメッシュレス法についての高速化を目指す。まず1つ目は、偏微分方程式の弱形式を離散化し、最終的に連立1次方程式に帰着させる方法であり、こちらは研究開始当初の背景にも記述している。2つ目は、メッシュレス法の形状関数を利用して直接偏微分方程式を離散化し、漸化式に帰着させる方法である。

前者における行列要素計算の高速化は、メッシュレス法向けの陰関数を GPU 環境で実装してから高速化を目指す。一方、行列要素計算後の連立1次方程式の高速化については、陰関数が GPU で実装されていなくても独立して高速化の検討をすることができるため、GPU 環境で陰関数の実装が遅れた場合には、先んじて取り組む。いずれの並列化も、並列計算に特化したハードウェア(GPU, MIC)を利用して高速化を目指す。

一方、後者については、電磁波伝搬解析をメッシュレス法で行い、まずは導波管が比較的単純なケースを扱うため、独立して高速化の検討を行う。高速化は、こちらでも GPU, MIC を使用して並列計算によって実現を目指す。加えて、メッシュレス法による電磁波伝搬解析については、分かっていないことも多いため、安定性の理論的な解析も行う。

4. 研究成果

(1) 高速に関数値計算可能な陰関数生成

従来の方法では、まず、入力点群から MPU(Multi-level Partition of Unity implicits)法などを利用して通常通りに陰関数を一旦生成した後、その陰関数から格子状に関数値を獲得し、それらを B-Spline によって結合することで、高速に関数値計算可能な陰関数を生成可能とした。一方、我々は、陰関数を一旦生成するプロセスを不要とし、関数値の代わりになる値を入力点群から直接獲得可能とする方法を提案した。

初年度からある程度の実装は出来ていたものの、陰関数の性質を満足しない場合があるなどの問題点が途中で判明し、予想以上に時間はかかったものの、最終的には Journal Paper としてアクセプトされた。論文投稿を優先させたため、GPU 環境での実装はしてい

ないものの、提案方は B-Spline を利用した方法であるため、GPU 環境で実装すれば陰関数曲面のリアルタイムレンダリングが可能である。また、レンダリングの前段階で必要な処理は、従来法と比較して、最大で約 12.7 倍高速化されることを確認した。また、実用的なパラメータ設定をすると、入力節点数にほとんど依存しないアルゴリズムであることを示した。

(2)メッシュレス解析システムの開発

まず、偏微分方程式の弱形式を離散化するタイプのメッシュレス法については、高速に関数値計算可能な陰関数生成を待たなくとも実施できる連立1次方程式の高速解法に特に力を入れた。具体的には、まず、メッシュレス法の1つである X-EFG 法(eXtended Element-Free Galerkin method)を使ったときに得られる連立1次方程式の解法について研究し、高速に解くための指針の一例を示した。また、同連立1次方程式に可変的前処理付き反復法を適用し、高速化した。同反復法は、前処理部分まで含めて反復法が使用されるため、MIC アーキテクチャで並列化し、さらに独自のチューニングを行うことにより、CPU での Serial 実行と比較して、Offload モードで約3倍高速化された。この結果は、10 コアの CPU を2つ搭載した計算機において OpenMP を使ったときの計算速度を上回っていることも確認した。

一方、メッシュレス法による電磁波伝搬解析については、FDTD 法のメッシュレス版ともいえる Meshless Time-Domain Method (MTDM)を適用し、安定性の理論的な解析および高速化の研究を行った。

まず、複雑な形状の導波管における電磁波伝搬シミュレーションを MTDM で行い、安定性について理論的に考察し、安定化のために最低限満たす必要のある条件を示した。一方、同法によるシミュレーションの高速化のために、新しい形状関数の導入を試みたが、前述した条件を満足しただけでは安定化させることが難しかった。したがって、他の安定条件の存在が予想されるが、それを理論的に導くことはできなかった。しかしながら、幾つかの数値実験によって獲得したデータを基に、形状関数変更時に安定性を保ったまま高速化させる方法について、具体的なパラメータと共に示した。

高速化については、GPU および MIC アーキテクチャを用いた MTDM の並列アルゴリズムを提案した。GPU を使った並列計算では、レジスタの使い方がパフォーマンスに大きく影響することを示し、適切なパラメータを選択することで、MTDM の時間発展計算が CPU での Serial 実行と比較して約 8.3 倍高速化された。また、MIC アーキテクチャでの並列計算では、MIC 向けの最適化をコンパイラだけに任せるのではなく、独自の最適化を行うことで、より高速化できることを示した。

MICでの並列化の第1段階として、提案法の評価は直線導波管における時間発展計算で行ったが、1つのCPUコアでの実行と比較して、Offloadモードで約8.16倍高速化された。

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 13 件)

- [1] T. Itoh, and S. Nakata, “Fast Generation of Smooth Implicit Surface Based on Piecewise Polynomial,” *Computer Modeling in Engineering & Sciences* (accepted), 査読有.
- [2] T. Itoh, Y. Hirokawa, and S. Ikuno, “High-Performance Computing of Electromagnetic Wave Propagation Simulation using Meshless Time-Domain Method on Many Integrated Core Architecture,” *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 51, 7204804 (2015), 査読有, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2353050
- [3] S. Ikuno, Y. Hirokawa, and T. Itoh, “Speedup of Iterative Solver for Electromagnetic Analysis Using Many Integrated Core Architecture,” *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 51, 7201504 (2015), 査読有, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2353036
- [4] A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui, and A. Kamitani, “Performance Improvement of Extended Boundary Node Method,” *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 51, 7204704 (2015), 査読有, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2347336
- [5] T. Itoh, S. Ikuno, and H. Nakamura, “Meshless Time-Domain Method with Modified RPIM-Based Shape Function for Electromagnetic Wave Propagation Simulation in Complex Shaped Domain,” *Plasma and Fusion Research*, Vol. 9, 3401088 (2014), 査読有, DOI: 10.1585/pfr.9.3401088
- [6] A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui, and A. Kamitani, “Acceleration Technique for Extended Boundary Node Method,” *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 50, No. 2, 7011404 (2014), 査読有, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2285587
- [7] T. Itoh, Y. Fujita, and S. Ikuno, “Investigation of Numerical Stability of Electromagnetic Wave Propagation Simulation using Meshless Time Domain Method,” *Plasma Fusion Res.*, Vol. 8, 2401101 (2013), 査読有, DOI: 10.1585/pfr.8.2401101
- [8] A. Saitoh, K. Miyashita, T. Itoh, A. Kamitani, T. Isokawa, N. Kmiura, and N. Matsui, “Accuracy Improvement of Extended Boundary-Node Method,” *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 49, No. 5, pp. 1601-1604 (2013), 査読有, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2243121
- [9] S. Ikuno, Y. Fujita, Y. Hirokawa, T. Itoh, S. Nakata, and A. Kamitani, “Large-Scale Simulation of Electromagnetic Wave Propagation using Meshless Time Domain Method with Parallel Processing Technique,” *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 49, No. 5, pp. 1613-1616 (2013), 査読有, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2245410
- [10] Y. Fujita, T. Itoh, H. Nakamura, and S. Ikuno, “Three-Dimensional Analysis of Electromagnetic Wave Propagation using Meshless Time Domain Method,” *Plasma and Fusion Research*, Vol. 8, 2401061 (2013), 査読有, DOI: 10.1585/pfr.8.2401061
- [11] T. Itoh, A. Saitoh, A. Kamitani, and H. Nakamura, “Implicit Function with Natural Behavior over Entire Domain,” *Plasma and Fusion Research*, Vol. 7, 2404048 (2012), 査読有, DOI: 10.1585/pfr.7.2406068
- [12] A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui, A. Kamitani and H. Nakamura, “Application of Collocation Meshless Method to Eigenvalue Problem,” *Plasma and Fusion Research*, Vol. 7, 2406096 (2012), 査読有, DOI: 10.1585/pfr.7.2406096
- [13] S. Ikuno, Y. Fujita, T. Itoh, S. Nakata, H. Nakamura and A. Kamitani, “Numerical Simulation of Electromagnetic Wave Propagation using Time Domain Meshless Method,” *Plasma and Fusion Research*, Vol. 7, 2406044 (2012), 査読有, DOI: 10.1585/pfr.7.2406044

[学会発表] (計 30 件)

- [1] 伊東拓, 廣川祐太, 黒川弘章, 生野壮一郎, “Many Integrated Core アーキテクチャを用いた電磁界解析の高速化,” 電気学会研究会資料(静止器/回転機合同研究会), SA-15-11/RM-15-3, pp. 11-14, 沖縄県宮古島市, 宮古島マリンターミナル, 2015年3月5日.
- [2] T. Itoh, Y. Hirokawa, A. Saitoh, S. Ikuno, A. Kamitani, and H. Nakamura, “Speed-up of Extended Element-Free Galerkin Method on Many Integrated Core Architecture,” 24th International Toki Conference (ITC-24), Ceratopia Toki, Toki, Gifu, Japan, Nov. 6, 2014.
- [3] T. Itoh, and S. Ikuno, “Investigation of Meshless Time-Domain Method with Interpolating Moving Least-Squares Based Shape Functions,” AsiaSim & JSST 2014, Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu, Fukuoka, Japan, Oct. 30, 2014.
- [4] S. Ikuno, Y. Ohi, and T. Itoh, “Numerical Investigations for Stable Calculation of Meshless Time Domain Method: Influence of Node Alignment on Numerical Stability,” AsiaSim & JSST 2014, Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu,

- Fukuoka, Japan, Oct. 29, 2014.
- [5] 伊東拓, 廣川祐太, 藤田宜久, 行木省吾, 多田野寛人, 生野壮一郎, “電磁界解析で表れる連立 1 次方程式に対する可変的前処理付き反復法の MIC を用いた高速化,” 第 6 回「学際計算科学による新たな知の発展・統合・創出」シンポジウム, 茨城県つくば市, 筑波大学 算科学研究センター, 2014 年 10 月 22 日.
- [6] 伊東拓, 生野壮一郎, “Modified RPIM の形状関数を用いた Meshless Time-Domain Method の安定化,” 日本応用数理学会 2014 年度年会, 東京都港区, 政策研究大学院大学, 2014 年 9 月 5 日.
- [7] 齋藤歩, 伊東拓, 松井伸之, 神谷淳, “RBF 型関数の違いが拡張境界節点法の性能に与える影響,” 日本応用数理学会 2014 年度年会, 東京都港区, 政策研究大学院大学, 2014 年 9 月 4 日.
- [8] S. Ikuno, S. Nakata, Y. Hirokawa, and T. Itoh, “High Performance Computing of Meshless Time Domain Method on Multi-GPU Cluster,” International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences 2014, NH Parque Avenidas hotel, Madrid, Spain, Aug. 29, 2014.
- [9] Y. Hirokawa, T. Itoh, H. Tadano, and S. Ikuno, “Speedup and Numerical Evaluation of Multiple-Precision Krylov Subspace Method using GPU Cluster for Large-Sparse Linear System,” Supercomputing Conference 2013 (SC13), Denver Convention Center, Denver, USA, Nov. 19, 2013.
- [10] T. Itoh, A. Saitoh, S. Ikuno, and A. Kamitani, “Electrostatic Simulation in Dielectric Composite Material by Extended Element-Free Galerkin Method,” Asia Simulation Conference 2013 (AsiaSim 2013), Concorde Hotel, Singapore, Nov. 8, 2013.
- [11] S. Ikuno, Y. Hirokawa, T. Itoh, “Implementation of Multiple-Precision Arithmetic Krylov Subspace Method on GPU using CUMP,” 32nd JSST Annual Conference (JSST 2013), Meiji Univ. Surugadai campus, Tokyo, Japan, Sep. 13, 2013.
- [12] T. Itoh, S. Ikuno, and S. Nakata, “Electromagnetic Wave Propagation Simulation by Meshless Time-Domain Method Embedding Modified RPIM-Based Shape Functions,” 32nd JSST Annual Conference (JSST 2013), Meiji Univ. Surugadai campus, Tokyo, Japan, Sep. 12, 2013.
- [13] A. Saitoh, T. Itoh, N. Matsui, A. Kamitani, “Speed Improvement of Extended Boundary-Node Method by Applying of Radial Point Interpolation Method,” 32nd JSST Annual Conference (JSST 2013), Meiji Univ. Surugadai campus, Tokyo, Japan, Sep. 12, 2013.
- [14] 伊東拓, 生野壮一郎, “電磁波伝搬解析における FDTD と MTDM の結合手法とその性能評価,” 日本応用数理学会 2013 年度年会, 福岡県福岡市, アクロス福岡, 2013 年 9 月 11 日.
- [15] 大西章介, 齋藤歩, 伊東拓, 神谷淳, 上浦尚武, 松井伸之, “拡張境界節点法の高速化 -形状関数が計算スピードに与える影響-,” 日本応用数理学会 2013 年度年会, 福岡県福岡市, アクロス福岡, 2013 年 9 月 10 日.
- [16] T. Itoh, and S. Ikuno, “Electromagnetic Wave Propagation Simulation in Complex Shaped Domain using Hybrid Method of FDTD and MTDM,” Conference on the Computation of Electromagnetic Fields 2013 (COMPUMAG 2013), Hilton Budapest, Budapest, Hungary, Jul. 4, 2013.
- [17] T. Itoh, and S. Ikuno, “Fast Implementation of Meshless Time Domain Method for Electromagnetic Wave Propagation Simulation in Complex Shaped Domain,” International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences 2013 (ICCES 2013), Bellevue Hilton Hotel, Seattle, USA, May 25, 2013.
- [18] 伊東拓, 仲田晋, “中間陰関数を必要としない高速レンダリング可能な陰関数生成法,” 2012 年度【プラズマ-壁相互作用シミュレーション解析に関する研究会】非線形・可視化部門研究会, 岐阜県土岐市, 核融合科学研究所, 2013 年 3 月 15 日.
- [19] 藤田宜久, 伊東拓, 生野壮一郎, 中村浩章, “MTDM を用いた導波路内電子波伝播解析,” 2012 年度【プラズマ-壁相互作用シミュレーション解析に関する研究会】非線形・可視化部門研究会, 岐阜県土岐市, 核融合科学研究所, 2013 年 3 月 15 日.
- [20] T. Itoh, A. Saitoh, S. Ikuno, A. Kamitani, “Application of Extended Element-Free Galerkin Method to Electrostatic Problem in Dielectric Composite Material,” The 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2012), Oita Oasis Tower Hotel, Oita, Oita, Japan, Nov. 14, 2012.
- [21] Y. Ohi, Y. Fujita, T. Itoh, S. Nakata, A. Kamitani, and S. Ikuno, “Influence of Weight Function on Numerical Stability of Meshless Time Domain Method Based on RPIM,” The 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2012), Oita Oasis Tower Hotel, Oita, Oita, Japan, Nov. 13, 2012.
- [22] T. Itoh, “Estimation of Point Normals from Positional Relationship of Three-Dimensional Scattered Point Data,” International Conference on Simulation Technology 2012, Integrated Research Center, Kobe Univ.,

- Kobe, Hyogo, Sep. 28, 2012.
- [23] S. Ikuno, Y. Oishi, T. Itoh, and A. Kamitani, "Investigations of Linear System Obtained by Element-Free Galerkin Method: Influence of Imposing Method for Boundary Condition," International Conference on Simulation Technology 2012, Integrated Research Center, Kobe Univ., Kobe, Hyogo, Sep. 28, 2012.
- [24] K. Miyashita, A. Saitoh, T. Itoh, A. Kamitani, N. Kamiura, and N. Matsui, "Development of Modified Extended Boundary-Node Method –New Approach for Determining Data Points–," International Conference on Simulation Technology 2012, Integrated Research Center, Kobe Univ., Kobe, Hyogo, Sep. 28, 2012.
- [25] T. Itoh, S. Ikuno, and A. Kamitani, "Numerical Investigation of Linear Systems Obtained by Extended Element-Free Galerkin Method," The 15th International IGTE Symposium (IGTE 2012), pp. 47-52, Hotel Novapark, Graz, Austria, Sep. 17, 2012.
- [26] S. Ikuno, Y. Fujita, T. Itoh, S. Nakata, and A. Kamitani, "Electromagnetic Wave Propagation Simulation in Corrugated Waveguide using Meshless Time Domain Method," The 15th International IGTE Symposium (IGTE 2012), pp. 53-58, Hotel Novapark, Graz, Austria, Sep. 17, 2012.
- [27] T. Itoh, Y. Fujita, S. Ikuno, and S. Nakata, "Electromagnetic Wave Propagation Simulation in Complex Shaped Domain using Meshless Time Domain Method," ICCES Special Symposium on Meshless & Other Novel Computational Methods (ICCES MM'12), Maestral Hotel, Budva, Montenegro, Sep. 5, 2012.
- [28] S. Ikuno, Y. Fujita, T. Itoh, and S. Nakata, "Influence of Node Alignment on Numerical Stability of Meshless Time Domain Method," ICCES Special Symposium on Meshless & Other Novel Computational Methods (ICCES MM'12), Maestral Hotel, Budva, Montenegro, Sep. 5, 2012.
- [29] 伊東拓, 生野壮一郎, 神谷淳, "X-EFG 法によって得られる非対称連立 1 次方程式に対するソルバーの検討," 日本応用数理学会 2012 年度年会, 北海道稚内市, 稚内全日空ホテル, 2012 年 8 月 30 日.
- [30] 宮下健太, 齋藤歩, 伊東拓, 神谷淳, 上浦尚武, 松井伸之, "複雑形状に対する拡張境界節点法の精度向上," 日本応用数理学会 2012 年度年会, 北海道稚内市, 稚内全日空ホテル, 2012 年 8 月 30 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊東 拓 (ITOH, Taku)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・助教

研究者番号 : 80433853