

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月1日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2012

課題番号：20560369

研究課題名（和文） 大規模非線形システムの実用的な大域的求解法に関する研究

研究課題名（英文） Study of practical globally-convergent algorithms for solving large-scale nonlinear systems

研究代表者

山村 清隆（YAMAMURA KIYOTAKA）

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：30182603

研究成果の概要（和文）：

大規模非線形システムの数値解析の分野では、「問題の本質的難しさ」「理論研究の不足」「理論的に優れた方法が提案されているが、実現容易性が低く、実用化が困難である」などの理由により、未解決のままとなっている問題や、理論が実用に結びつかない問題が数多く生じている。特に「任意の初期値から必ず解に収束するアルゴリズム」「すべての解を求めるアルゴリズム」などの大域的求解法の分野では、その重要性にもかかわらず未解決のまま残されている課題が多い。本研究では、大規模集積回路をはじめとする様々な非線形システムに対する効率的で実用的な（実現容易な）大域的求解法の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

In this project, we developed efficient and practical globally-convergent algorithms for solving large-scale nonlinear systems including large-scale integrated circuits. We first proposed an efficient homotopy method for solving nonlinear circuits, and prove its global convergence property for modified nodal equations that describe nonlinear circuits. By this method, bipolar analog integrated circuits with more than 20000 elements were solved efficiently with the theoretical guarantee of global convergence. We also proposed an effective method for implementing the homotopy method on the general-purpose circuit simulator SPICE. By this method, we can implement a sophisticated homotopy method using various efficient techniques easily without making complicated programs. We next proposed an efficient algorithm for finding all solutions of nonlinear circuits using linear programming. By this algorithm, all solutions of large-scale systems where the number of variables is several thousands could be found in practical computation time. We further proposed an efficient method for finding all solutions of piecewise-linear circuits using integer programming. In this method, we formulate the problem of finding all solutions by a mixed integer programming problem, and solve it by a high-performance integer programming software such as SCIP or CPLEX. By this method, all solutions can be found easily without making complicated programs. Thus, we have developed various types of globally-convergent algorithms that are good at efficiency and practicality.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：非線形理論・回路・非線形数値解析・大規模集積回路・回路シミュレーション・数理計画法

1. 研究開始当初の背景

大規模集積回路をはじめとする非線形システムの数値解析の分野では、「問題の本質的な難しさ」「理論研究の不足」「理論的には興味深い方法が提案されているが、実現容易性が低く、実用化が困難である」などの理由により、未解決のままとなっている問題や、理論が実用に結びつかない問題が数多く生じていた。特に「任意の初期値から必ず解に収束するアルゴリズム」「すべての解を求めるアルゴリズム」などの大域的求解法の分野では、その重要性にもかかわらず、未解決のまま残されている課題が多く存在した。

2. 研究の目的

本研究では、著者（研究代表者）が理論と実用をつなぐ位置に立っているという特殊性を背景に、このような問題に焦点をあてた研究を行い、様々な大規模非線形システムに対する効率的で実用的な大域的求解法の開発を行う。

3. 研究の方法

中心となる研究テーマとして

- (1) 回路シミュレーションにおける非収束問題に関する研究
- (2) 非線形回路のすべての解を求める効率的なアルゴリズムに関する研究
- (3) 整数計画法を用いた全解探索法の実用性の向上に関する研究
- (4) 一般化線形相補性理論を用いた区分的線形回路の完全解析に関する研究

の4テーマを設定し、これらを中心とする研究を（周辺分野の調査を含めて）互いに補完しながら同時進行するとともに、各年度ごとに重点的に推進するテーマを設定する。

研究規模、研究体制は「研究代表者と大学院生」とする。

4. 研究成果

本研究では、「計算効率に優れた大域的求解法」と「実現容易性に優れた大域的求解法」の開発を行い、以下のような成果を得た。

(1) ホモトピー法を用いた非線形回路の大域的求解法を開発し、その大域的収束性を証明した。さらに企業との共同研究により、最も解析が困難とされるバイポーラアナログ回路に対して、その最大級である2万素子クラスのアナログLSIを世界で初めて収束の保証付きで解くことに成功した（図1）。

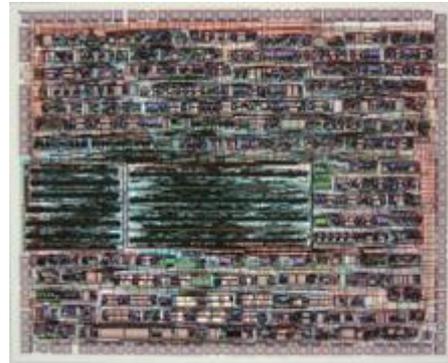


図1 開発された世界最大級のアナログLSIのレイアウト図

(2) 誰でも簡単に高度なホモトピー法を利用できるようにするためのSPICE指向型解析法というアイデアを考案し、ホモトピー法の実装を大幅に単純化した。これによりホモトピー法の実用性は飛躍的に向上した。

(3) 直流動作点解析のための効率的な可変利得ホモトピー法を開発し、その大域的収束性を証明した。またこの方法がMOSトランジスタ回路に対しても極めて有効性が高いことを実証した。

(4) 集合値写像の概念を用いた非線形回路の新しい変動解析法を開発し、その有効性を検証した。この方法により、素子特性が（小さなあるいは大きな）変動をしたとき、回路全体の特性がどのように変動するかをかなり高い精度で見積もることができる。このことはより品質の高い、信頼性の高い回路を開発する上で重要となる。

(5) LSI設計における重要な未解決問題である「非線形回路のすべての解を求める実用的なアルゴリズムの開発」に対し、線形計画法を用いて解の存在する領域を大幅に縮小させる“LP縮小”というアイデアを用いた、非線形回路に対する極めて効率的な全解探索法を開発し、これまで不可能とされた数千～数万素子クラスの全解探索に成功した。

(6) 非線形回路を記述する回路方程式にはいくつかの種類があるが、その中で混合方程式と状態方程式は上記のアルゴリズムとは極めて相性が良く、効率的である。しかしこれらの方程式は定式化がかなり複雑であるため、実用面で使われることはほとんどなか

った。本研究では、汎用回路シミュレータ SPICE の過渡解析を用いて混合方程式と状態方程式を導出する、簡単で実用的な方法を提案した。

(7) 全解探索法のアルゴリズムはインプリメンテーションの際に高度な専門的知識と複雑なプログラミングを必要とするため、大学院生レベルの研究者には敷居の高い方法であった。本研究では、初心者でも簡単にインプリメントすることのできる実現容易な非線形回路の全解探索法を提案した。本手法は、非線形回路を記述する方程式を混合整数計画問題に定式化し、それに SCIP、CPLEX といった非商用/商用の優れた整数計画法のソフトウェアを適用するもので、複雑なプログラムを作る必要がなく、簡単に全解探索を行うことができる。

(8) 区分的線形抵抗回路の解析では、非常に複雑な形状の解集合をもつ回路を扱うことがある。例えば解の個数が無限となる回路、解集合が曲線、平面などの連続集合となる回路、解集合が有界でない回路などである。このような複雑な形状の解集合をもつ回路のすべての解を求めることを完全解析と呼ぶ。本研究では、回路を記述する一般化線形相補性問題を等価な混合整数計画問題で定式化し、それを整数計画ソルバーで解くことにより区分的線形抵抗回路の完全解析を行う、実現容易性に優れた方法を提案した。

以上の研究により、大規模集積回路をはじめとする様々な非線形システムに対する効率的で実用的な大域的求解法を開発することに成功し、研究開始当初に設定した研究目標はほぼ達成することができた。

本研究の成果は多くの国際誌や国際会議等で発表され、この分野に大きなインパクトと波及効果を与えている。

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 26 件)

- ① K. Yamamura and M. Tonokura,
“Formulating hybrid equations and state equations for nonlinear circuits using SPICE,” International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 41, no. 1, pp. 101-110, Jan. 2013, 査読有.
- ② K. Yamamura and N. Tamura,
“Finding all solutions of separable systems of piecewise-linear equations

using integer programming,”
Journal of Computational and Applied Mathematics, vol. 236, issue 11, pp. 2844- 2852, May 2012, 査読有.

- ③ K. Yamamura,
“Quadratic convergence of the shooting method using implicit integration formulas and Newton’s method,” International Journal of Numerical Methods and Applications, vol. 6, Issue 1, pp. 87-104, Sept. 2011, 査読有.
- ④ K. Yamamura, K. Suda, and N. Tamura,
“LP narrowing: A new strategy for finding all solutions of nonlinear equations,” Applied Mathematics and Computation, vol. 215, issue 1, pp. 405-413, Sept. 2009, 査読有.
- ⑤ K. Yamamura and K. Suda,
“An efficient and practical algorithm for finding all DC solutions of nonlinear circuits using GLPK,” IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E92-A, no. 2, pp. 638-642, Feb. 2009, 査読有.
- ⑥ K. Yamamura and Y. Haga,
“DC tolerance analysis of nonlinear circuits using set-valued functions,” Journal of Circuits, Systems, and Computers, vol. 17, no. 5, pp. 785-796, Oct. 2008, 査読有.
- ⑦ K. Yamamura and A. Machida,
“An efficient algorithm for finding all DC solutions of piecewise-linear circuits,” International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 36, no. 8, pp. 989-1000, Nov. 2008, 査読有.

[学会発表] (計 28 件)

- ① H. Tanaka, H. Kato, and K. Yamamura,
“Finding all solutions of piecewise-linear resistive circuits using separable programming,” Proceedings of 2012 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, Tokushima, Japan, pp. 67-70, 2012 年 12 月 15 日, 査読有.
- ② K. Yamamura and T. Miyamoto,
“DC operating point analysis of transistor circuits using the variable-gain homotopy method,” Proceedings of International Technical Conference on Circuits/ Systems, Computers and Communications, B-T3-04, 2012 年 7 月 17 日, 査読有.

- ③ K. Yamamura and T. Ueda,
“Finding all solutions of piecewise-linear resistive circuits using integer programming,” Proceedings of 20th IEEE European Conference on Circuit Theory and Design, Linkoping, Sweden, pp.657-660, 2011年8月30日, 査読有.
- ④ K. Yamamura, N. Tamura, and T. Ueda,
“Finding all DC solutions of piecewise-linear circuits using integer programming,” Proceedings of 2009 IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, Tokushima, Japan, pp.37-40, 2009年12月11日, 査読有.
- ⑤ K. Yamamura, N. Tamura, and K. Suda,
“An efficient algorithm for finding all DC solutions of nonlinear circuits using LP narrowing,” Proceedings of 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Taipei, Taiwan, pp.2081-2084, 2009年5月26日, 査読有.
- ⑥ K. Yamamura, N. Tamura, and K. Suda,
“LP narrowing: A new strategy for finding all solutions of nonlinear equations,” Book of Abstracts, 13th GAMM -- IMACS International Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetic, and Validated Numerics, pp.149-150, 2008年9月30日, 査読有.

[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

山村 清隆 (YAMAMURA KIYOTAKA)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：30182603