非線形システムの数値解析法の開発と LSI設計への応用に関する研究

研究代表者　山村清隆 研究員

非収束問題を解決したホモトピー法

回路シミュレーション

- LSI 設計では回路を記述する非線形方程式 $f(x) = 0$ をコンピュータで解くことが中心的作業の一つとなる
- SPICE ･･･ 世界中で使用されている回路シミュレータ

SPICEにおけるニュートン法の非収束問題

- 初期値を解の近くに取らないと収束しないという欠点をもつ（非収束問題）

⇒ 大きなボトルネックとして世界中の設計者を悩ませていた

ホモトピー法 ･･･ 非収束問題を解決した方法

解きたい方程式

$$f(x) = 0$$

x^0を解とする方程式

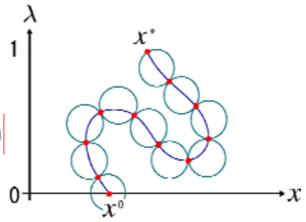
$$f^0(x) = 0$$

ホモトピー関数

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \lambda) = \lambda \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) + (1-\lambda)\boldsymbol{f}^0(\boldsymbol{x})$$

球面を用いて解曲線を追跡し解を求める

（大域的収束性が保証されている）



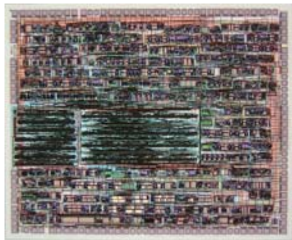
ホモトピー法のイメージ図

産業界におけるホモトピー法の実績

- バイポーラアナログ回路としては最大級である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
- 本技術を使用して設計・開発・製造したバイポーラアナログLSIの実績
  - 【生産金額】年間約800億円
  - 【生産数量】年間10～12億個
  - 【開発期間】2年から1年に短縮
  - 【開発技術】例えば音響・映像機器向けの各種高機能・高性能1チップLSIの開発に成功
  - 【主な使用先】家庭用電気製品、マルチメディア製品、パソコン、携帯電話等に使用されている
- 左記のアルゴリズムは次世代SPICEプロジェクトでも採用

掲載誌： Yamamura et al., IEEE Trans. CAS

開発された世界最大級のバイポーラアナログＬＳＩ



上記ＬＳＩのレイアウト図

可変利得ニュートンホモトピー法

可変利得ニュートンホモトピー法におけるホモトピー関数

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, \lambda) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \lambda\boldsymbol{\alpha}) - (1-\lambda)\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}^0, 0 \cdot \boldsymbol{\alpha})$$

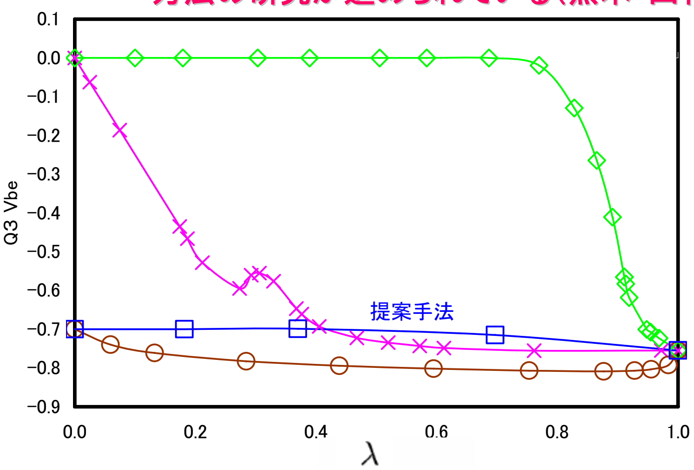
最も効率的なホモトピー法

⇒ 現在VGNH法をSPICEに容易に実装する方法の研究が進められている（黒木・山村）

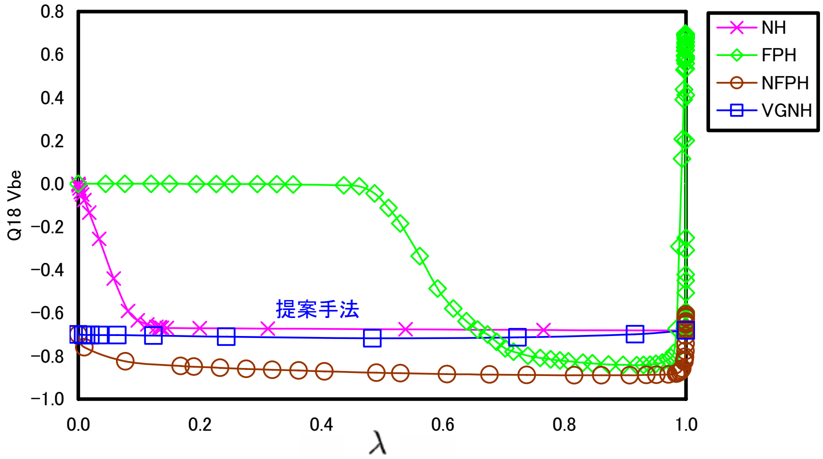
可変利得ニュートンホモトピー法の特徴

これまで提案されたホモトピー法のすべての長所を兼ね備え，かつ欠点が解消された方法となっている

- 任意の初期値 に対して大域的収束性が保証されている
  ⇒ 良い初期値を使うことができる
- 関数に線形項が含まれない
  ⇒ 解曲線の複雑な挙動が起こりにくくなる
- 可変利得の概念が導入
  ⇒ 解曲線は短くスムーズになりやすい



基準電圧回路HVRefに対する計算結果



高利得演算増幅器 μA741に対する計算結果