

# ファジィ仕様にもとづく知的回路設計方式の提案

○安藤和也<sup>1</sup> 瀧谷長史<sup>1</sup> 瀧末政憲<sup>2</sup> 雨宮真一郎<sup>2</sup> 青木均<sup>2</sup> 安信誠二<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>筑波大学大学院システム情報工学研究科, <sup>2</sup>モーデック

## A fuzzy specification based intelligent design of electronic circuits

\*K. Ando<sup>1</sup>, T. Shibuya<sup>1</sup>, M. Shimasue<sup>2</sup>, S. Amemiya<sup>2</sup>, H. Aoki<sup>2</sup>, S. Yasunobu<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba,  
<sup>2</sup>MoDeCH Inc.

**Abstract**— This paper proposes a fuzzy specification based intelligent design method of electric circuits. Designing electronic circuit is highly important and challenging problem. Especially in designing large and complex circuits, it is almost impossible to design to meet all specifications, because characteristics are not independent. Therefore, a method which can consider degree of satisfaction of specification is required. In this paper, a novel representation of specification using fuzzy membership functions and a method to determine design variables are proposed. It is confirmed that proposed method enables to design single transistor amplifier automatically and appropriately.

**Key Words:** Fuzzy specification, Intelligent design, Electronic circuits

### 1 はじめに

現代社会において、電子機器が広く普及している。これら電子機器の様々な動作を実現するための技術が電子回路設計である。電子回路設計とは設計仕様を満足するように回路素子パラメータを決定することである。

電子回路設計は知識や経験に頼るところが大きいため、難しいとされる。具体的な電子回路設計の難しさとしては、設計方法が体系化されていないこと、十分な特性を設計仕様とすると設計不可能な場合があること、必要な特性を設計仕様とすると良質な回路設計ができないことなどがある。これらの問題を解決するために、回路自動設計に関する研究が多く行われている。例えば、遺伝的アルゴリズムや遺伝的プログラミングの進化的計算手法を適用する研究<sup>1)2)</sup>や設計方法を保存し再利用する研究<sup>3)</sup>などがあるが、いずれも実用化の段階には至っていない。

一方で、熟練者は設計仕様の特性に対する必要性や十分性を考慮することにより、回路設計を行っている。そこで本研究では、こうした熟練者の回路設計手順をとりいれ、必要性と十分性を考慮した望ましい特性を実現する回路設計方式の構築を目的とし、ファジィ仕様にもとづく知的回路設計方式を提案する。ここでファジィ仕様とは、望ましい特性をメンバシップ関数で表した仕様である。ファジィ仕様により設計仕様の特性に対する必要性や十分性を設計に取り入れることができる。

本方式では、まず、回路素子パラメータ自動設計<sup>4)</sup>による設計結果からシミュレータを用いて回路特性を取得する。そして、設計仕様をファジィ化したファジィ仕様にもとづく特性評価を行い、満足度が高い回路を設計結果として出力する。周波数特性を設計仕様の例としたトランジスタの選定を含む1段トランジスタ増幅回路設計を本方式により行い、その有効性を示す。

### 2 熟練者による回路設計手順について

本研究では、トランジスタの選定を含む1段トランジスタ増幅回路の熟練者の設計手順を以下のようにとらえる。

1. あるトランジスタの規格について、他の回路素子パラメータを設計
2. 設計仕様ごとに回路の特性を評価 (特性評価)
3. 特性評価にもとづき、全ての設計仕様について回路を総合評価 (多目的評価)
4. 以上を繰り返し、総合評価がもっともよい回路を選択

回路素子パラメータの設計において、熟練者は設計仕様を考慮して電子回路における法則を利用し、既知パラメータから未知パラメータを設計している。

特性評価はあるひとつの設計仕様について、回路のよさを評価することである。多目的評価は全ての設計仕様について、回路のよさを評価することである。

例えば、1段トランジスタ増幅回路設計においては、次の手順に相当する。

1. あるトランジスタの規格について、バイアス抵抗を設計する。
2. 複数の周波数それぞれにおけるゲイン特性で評価を行う。
3. それらをまとめた複数の周波数におけるゲイン特性の組で評価を行う。
4. 評価にもとづいてもっともよい回路を選択する。

### 3 ファジィ仕様にもとづく知的回路設計方式

熟練者の知識を工学的に表現・活用する技術としてファジィが知られている<sup>5)</sup>。ファジィによって望ましい特性をメンバシップ関数で表現することにより、必要性と十分性を考慮した設計法の提案を行う。

第2節で述べた熟練者による回路設計手順から構築したファジィ仕様にもとづく知的回路設計方式による1段トランジスタ増幅回路設計システムを Fig. 1 に示す。このシステムは回路素子パラメータ自動設計とファジィ仕様にもとづく評価の2つのサブシステムからな

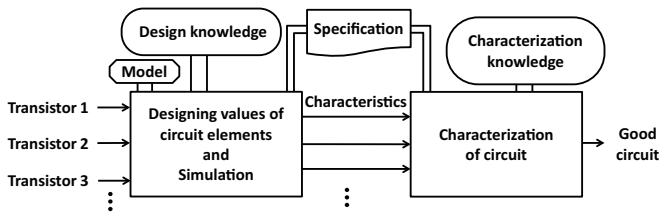


Fig. 1: A system of intelligent design of circuits

る。まず、トランジスタの規格を読み込んで、回路素子パラメータ自動設計により、他の回路素子パラメータを設計する。次に LTspice によってシミュレーションを行い、回路特性を取得する。得られた回路特性に対して、ファジィ仕様にもとづく特性評価、多目的の評価を行い、設計回路の総合評価値を求める。以上を複数のトランジスタに対して行い、総合評価値が最も高い設計回路を出力する。

以降、この節ではそれぞれのサブシステムの詳細について述べる。

### 3.1 回路素子パラメータ自動設計

このサブシステムでは、トランジスタが与えられるという条件のもとで、法則や設計知識をもちいて回路の素子パラメータを設計する。

#### 3.1.1 回路情報の処理

電子回路をコンピュータ上で扱うために、LTspice を用いた。LTspice は電子回路図を作成することで、コンピュータ上でシミュレーションを実行することができるソフトウェアである<sup>6)</sup>。また、回路情報をテキスト形式で表現することも可能であり、これをネットリストという。本研究ではこのネットリストを読み込んで回路設計を行う。また、読み込んだネットリストから設計処理を行いやすくするために設計テーブルを作成する。設計テーブルは以下の4種類から構成される。

- ・ ノードテーブル
- ・ アークテーブル
- ・ 電圧源テーブル
- ・ 補助回路テーブル

まず、ノードテーブルは、回路上の各接点を要素として持ち、その点における電位を変数とする。次に、アークテーブルは回路上の各素子を要素として持ち、その素子のインピーダンスと流れる電流値を変数として持つ。そして、電圧源テーブルは回路上の電圧源を要素として持ち、その電位差を変数として持つ。最後に補助回路テーブルは回路上の能動素子などが要素となる。トランジスタの場合には、ベース-エミッタ間電流、コ

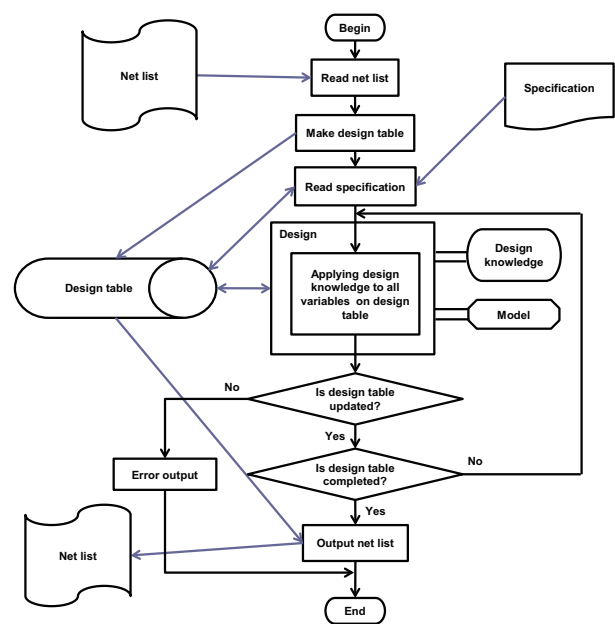


Fig. 2: A flow chart of designing values of circuit elements

レクタ-エミッタ間電流、ベース-エミッタ間電圧、コレクタ-エミッタ間電圧を変数として持つ。

#### 3.1.2 回路素子パラメータ自動設計処理フロー

回路素子パラメータ自動設計の処理フロー Fig. 2 について述べる。まず、未設計ネットリストを読み込んで、設計テーブルを作成する。設計テーブル上で未知の変数には未設計であることを表す記号が書き込まれる。次に、設計仕様を読み込んで、それによって決まる設計テーブル上の値を更新する。次に、設計テーブル上の全ての変数に対して、設計知識を適用し、値を決める。法則を活用した回路素子パラメータ設計方法が設計知識である。これ以上設計を継続しても、未設計の変数を1つも決めることが出来ない場合は、エラー出力をして設計終了となる。設計継続可能な場合には、設計成功判定を行い、未設計変数が無い場合には設計後ネットリストを出力して終了となる。未設計変数が残っている場合には、再び設計操作を行う。これを繰り返し、各回路素子パラメータを設計する。

### 3.2 ファジィ仕様にもとづく特性評価と多目的評価

本稿では、2節で述べた特性評価と多目的評価を行うために、ファジィによって仕様を表現する手法としてファジィ仕様を提案する。

#### 3.2.1 特性評価

望ましい特性をメンバシップ関数で表現した仕様としてファジィ仕様を提案する。メンバシップ関数は集合の各要素に対してある概念に属する度合いを0.0から1.0の間の連続値で定義する。例えば、設計回路のある周波数におけるゲイン特性について、望ましいゲインの値をメンバシップ関数により定義すれば、ゲイ

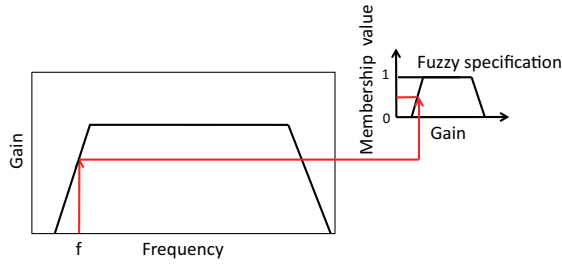


Fig. 3: Characterization by fuzzy specification.

ンの値を集合の要素として望ましいゲインの値に属する度合いを得ることができる。これをメンバシップ値と呼ぶ。ファジィ仕様を用いることで、設計回路の仕様に対する満足度を表すことができ、メンバシップ値が1に近いほど十分な特性であり、0より大きければ必要な特性は満たしているというように必要性と充分性を考慮した設計が可能となる。ファジィ仕様を用いたある周波数  $f$  におけるゲイン特性の評価を Fig. 3 に示す。

### 3.2.2 多目的評価

ファジィ仕様にもとづく特性評価により得られた望ましい特性に属する度合いについて設計回路の総合評価を行う。その手段として、以下のルールを設定する。

- Select  $C_i$ , if  $a$  is  $A$  and  $b$  is  $B$ . ( $i=1,2,\dots,N$ )

これは、設計回路の候補  $C_i$  について評価指標  $a$  は  $A$  であり、評価指標  $b$  は  $B$  であるならば、設計回路の候補  $C_i$  を望ましい設計結果として出力することを意味する。 $A$ ,  $B$  は望ましい特性であり、各評価指標についてメンバシップ値を計算する。各評価指標に対するメンバシップ値全てにおける最小値を、その設計回路の総合評価値とする。総合評価値が最大となる設計回路、すなわち設計仕様に対して、望ましい設計回路を選択する。

## 4 設計

文献<sup>6)</sup>を参考にして、第3節で述べたファジィ仕様にもとづく知的回路設計システムにより、1段トランジスタ増幅回路の動作点設計とトランジスタ選定を行う。対象とする1段トランジスタ増幅回路を Fig. 4 に示す。Fig. 4 の  $R_2$ ,  $R_3$  について回路素子パラメータを設計することで動作点を設計し、 $Q_1$  の選定をファジィ仕様にもとづく特性評価と多目的評価により行う。

### 4.1 設計仕様と動作状態の指定

まず、回路素子パラメータ設計に必要な設計仕様を以下に示す。

- 増幅率：20[倍] (26[dB])

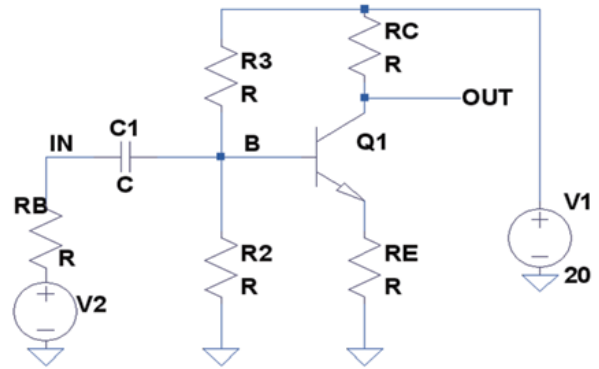


Fig. 4: A single transistor amplifier

- 直流電圧  $V_1$ :20[V]
- 入力信号; 内部インピーダンス  $R_B$ :10[ $\Omega$ ]

上述の設計仕様のほかに設計に必要な関係式は次の通りである。

- $V_{OUT} = V_1/2$
- $R_E = 1[\text{k}\Omega]$
- $R_C = 20[\text{k}\Omega]$
- $C_1 = 10[\mu\text{F}]$
- $I_{RC} = 500[\mu\text{A}]$
- $Q_1 I_B = 500/\beta$   
 $\beta$ : トランジスタの直流電流増幅率
- $I_{R2} = 20 * Q_1 I_B$

選定するトランジスタの候補は次の3種類である。

- 2N2219A  $\beta$ :255.9
- 2N3055  $\beta$ :73
- 2N5089  $\beta$ :1434

特性評価、多目的評価は0.5[Hz], 1[kHz], 1[MHz]の3つの周波数におけるゲインを評価指標として行う。ファジィ仕様はそれぞれ周波数においてゲインが26[dB]周辺でメンバシップ値が1になるメンバシップ関数として与えられる。

### 4.2 回路素子パラメータ設計の実行

トランジスタの候補それぞれを用いた場合の  $R_2$ ,  $R_3$  の回路素子パラメータ自動設計による設計結果を以下の Table 2 に示す。

Table 1: Results of  $R_2$  and  $R_3$

|         | $R_2$             | $R_3$            |
|---------|-------------------|------------------|
| 2N2219A | 30.7[k $\Omega$ ] | 458[k $\Omega$ ] |
| 2N3055  | 8.81[k $\Omega$ ] | 130[k $\Omega$ ] |
| 2N5089  | 172[k $\Omega$ ]  | 2.5[M $\Omega$ ] |

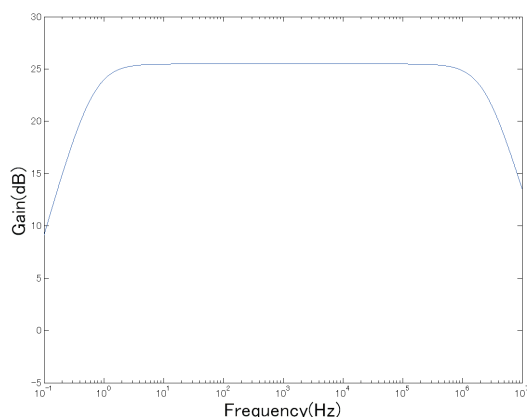


Fig. 5: Frequency-gain characteristic (2N2219A)

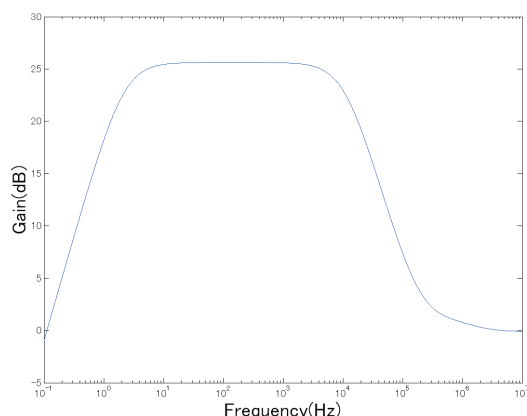


Fig. 6: Frequency-gain characteristic (2N3055)

#### 4.3 ファジィ仕様にもとづく特性評価, 多目的評価と出力結果

次に, 回路素子パラメータ設計によって得られた回路について, シミュレーションで得られたゲインを Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 にそれぞれ示す.  $R_2$ ,  $R_3$  とトランジスタの違いによって, 遮断周波数が変化したことが確認できた. 次に, 特性評価と多目的評価によって得られた各周波数におけるゲインのメンバシップ値と回路の総合評価値を以下の Table 2 に示す.

Table 2: Results by fuzzy specification based characterization

|         | 0.5Hz  | 1kHz | 1MHz | All    |
|---------|--------|------|------|--------|
| 2N2219A | 0.2933 | 1    | 1    | 0.2933 |
| 2N3055  | 0      | 1    | 0    | 0      |
| 2N5089  | 1      | 1    | 1    | 1      |

Table 2 の結果から, 総合評価値が最大である 2N5089 を使用した 1 段トランジスタ増幅回路の設計結果が出力された. 今回の 1 段トランジスタ増幅回路の設計では, 複数の周波数におけるゲイン特性の組をファジィ仕様にもとづいて評価することにより, 望ましい回路を設計結果として出力できることを確認した.

## 5 おわりに

本研究では, 必要性和十分性を考慮した望ましい特性を実現する回路設計方式を構築することを目的とし

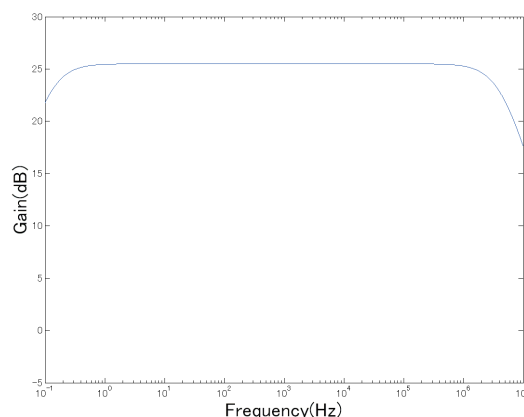


Fig. 7: Frequency-gain characteristic (2N5089)

て, ファジィ仕様にもとづく知的回路設計方式を提案した. ファジィ仕様により, 熟練者のように設計仕様に対する特性の必要性や十分性を取り入れた設計が可能となる. そして, 1 段トランジスタ増幅回路設計システムを構築し設計を行い, 設計仕様に対する満足度が高い回路を設計することが可能であり, 有効であることを示した.

この設計仕様をファジィ化したファジィ仕様にもとづく知的回路設計方式は設計者が要求する仕様をファジィ仕様として与えることで, 素子の値段, 回路の規模など様々な指標での回路設計が可能である. また, 回路設計に限らずその他の多目的設計問題についても適用可能な考え方である.

## 参考文献

- 1) Manuel Barros, Jorge Guilherme, Nuno Horta: Analog circuits optimization based on evolutionary computation techniques, Integration, the VLSI Journal, Vol. 43, Issue 1, 136/155 (2010)
- 2) 矢野雄一, 加藤利次, 井上馨, 三木光範: 並列遺伝的プログラミングによるフィルタ回路設計, 電学論 (C), vol.124 no.11, 2208/2214 (2004)
- 3) 森江隆史, 小野寺秀俊, 田丸啓吉: アナログ回路設計手順の保存・再利用化手法, 信学論 (A), vol.J76-A, no.10, 1457/1464 (1993)
- 4) 安藤和也, 澁谷長史, 安信誠二: 熟練者の設計知識による回路素子パラメータ設計自動化の試み, 第 61 回 知的制御研究会論文集, 9/12 (2012)
- 5) 安信誠二: ファジィ工学, 昭晃堂 (1991)
- 6) 渋谷道雄: 回路シミュレータ LTspice で学ぶ電子回路, オーム社 (2011)