| | |
|---|---|
| 氏名 | 馮（ひょう） 首（しゅ） 平（へい） |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士（工学） |
| 学位記番号 | 第 10775 号 |
| 学位授与年月日 | 平成5年3月25日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当<br>基礎工学研究科物理系専攻 |
| 学位論文名 | Coding Theoretical Approach to the Analysis of the Aliasing Probability in Signature Testing<br>（シグネチャ検査法における故障見逃し確率の符号理論的手法を用いた解析） |
| 論文審査委員 | （主査）<br>教授 嵩 忠雄<br>（副査）<br>教授 橋本 昭洋　教授 柏原 敏伸　教授 菊野 亨<br>助教授 藤原 融 |


## 論文内容の要旨

近年，大規模論理回路の故障検査を簡便に行うための一方法として，シグネチャ検査法が提案され，注目を集めている。シグネチャ検査法では，回路全体は次の4部分から成り立つ。被検査回路（ＣＵＴ），テストパターン生成回路，圧縮回路（シグネチャレジスタ），故障判定回路である。シグネチャレジスタとしては，線形フィードバックシフトレジスタ（ＬＦＳＲ）がよく使われる。ＬＦＳＲの入力線数によって，単一入力シグネチャレジスタ（ＳＩＳＲ）と多入力シグネチャレジスタ（ＭＩＳＲ）がある。故障検査は，以下のように行なわれる。まず，テストパターン系列を生成し，被検査回路に入力し，その出力系列をＬＦＳＲに入力する。ＣＵＴからの出力系列を入力し終ったときに，ＬＦＳＲの状態をその期待値と比較する。一致すれば，故障なし，そうでなければ，故障があると判断する。シグネチャレジスタで圧縮を行なったため，故障見逃しが起こり得る。本論文では，以下の仮定の下で故障見逃し確率の問題を考える。すなわち，故障は被検査回路だけに起こる。ＣＵＴの出力の誤りモデルとしては，単一および多出力回路に用いられる2元対称誤りモデルと $m$ 出力回路に用いられる $2^m$ 元対称誤りモデルなどがあり，本論文でもそれらを用いる。

故障見逃し確率はシグネチャ検査法の性能評価の上で非常に重要である。シグネチャ検査法における故障見逃し確率は，誤り検出符号の誤り見逃し確率に対応することが知られている。本論文では，シグネチャ検査法における故障見逃し確率を解析する。本論文の第2章では，誤り検出符号とシグネチャ検査法の関係について述べる。ＳＩＳＲの場合，テストパターン長 $n$, $GF(2)$上の多項式 $g(x)$ に基づく単一入力ＬＦＳＲの故障見逃し確率は，多項式 $g(x)$ で生成される長さ $n$ の符号 $C_n$ を2元対称通信路で用いたときの誤り見逃し確率に一致する。テストパターン長 $n$ は符号長に対応し，ＬＦＳＲの段数 $m$ は冗長点数に対応し，誤り発生率 $\varepsilon$ は2元対称通信路のビット誤り率に対応する。符号長nの線形符号 $C_n$ の重み分布が分かれば，誤り検出符号の誤り見逃し確率が求められる。しかし，重み分布の公式は，いくつか限られている符号しか知られていない。重み分布の計算量はＯ（$2^m$）であるため，冗長点数 $m$ が大きくなると，計算が困難になる。そこで，故障見逃し確率の上界あるいは下界による評価が必要になってくる。2章では，故障見逃し確率のある上界を示す。それは，線形計画法により重み分布の近似を求め，故障見逃し確率を近似する方法である。この上界は誤り率 $\varepsilon$ が小さいとき，既知の上界よりよい。

第3章では $GF$（$q$）上の誤り検出符号の $q$ 元対称通信路における誤り見逃し確率の単調性について述べる。誤り見逃し確率（故障見逃し確率）の単調性は，その振舞いを解明するのに役立つ。一般には，誤り見逃し確率は，誤り

率$\varepsilon$を固定したときに符号長$n$について単調ではないし，符号長$n$を固定したときに誤り率$\varepsilon$についても単調ではない。そこで，本論文では$q$元対称通信路における巡回符号の誤り見逃し確率が，(1)誤り見逃し確率が符号長$n$について単調であるための$\varepsilon$に関する十分条件を示した，(2)誤り見逃し確率が$\varepsilon$について単調であるための$n$に関する必要条件を示した。また，最大距離分離（ＭＤＳ）符号の誤り見逃し確率が符号長$n$について単調であることを示した。これは，よく使われているＭＩＳＲの故障見逃し確率がテスト長$n$について単調であることを意味している。なお，最大距離分離符号が$\varepsilon$について単調であることは既に知られている。

第４章では，同程度のハードウエア量の下で，２種類の多入力シグネチャレジスタの故障見逃し確率を比較した。一つは多重多入力シグネチャレジスタである。それは，入力数$m$のＭＩＳＲを$d$個重ねたものである。もう一つは部分入力シグネチャレジスタである。それは，入力数$m$，段数$dm$のＭＩＳＲである。それぞれのＭＩＳＲに対して，いろいろな$\varepsilon$と$n$について故障見逃し確率を計算した。そして，$\varepsilon$が比較的小さい場合，多重多入力シグネチャレジスタの方が部分入力シグネチャレジスタより故障見逃し確率が低いことが分かった。しかし，$\varepsilon$が比較的大きい場合，必ずしも多重多入力シグネチャレジスタの方が部分入力シグネチャレジスタより故障見逃し確率が低いとは限らない。

第５章では，同程度のハードウエア量の下で，いろいろな単一入力シグネチャレジスタの中で故障見逃し確率の比較について検討した。そして，$\varepsilon$（かつ$n$）に依存しない評価基準を提案した。それは，ある$\varepsilon$（かつ$n$）の範囲内の故障見逃し確率の最大値による評価である。その評価基準により，次数$m$が12と16のすべてのハミング符号の生成多項式（原始多項式）と，２重誤り訂正ＢＣＨ符号の生成多項式に基づくＬＦＳＲについて，(1)$m+1\leq n\leq 2^{m/2}-1$，$0\leq\varepsilon\leq 1/2$，(2)$m+1\leq n\leq 2^{m/2}-2$，$0\leq\varepsilon\leq 1$，の２つの範囲における故障見逃し確率の最大値による評価を行った。それぞれの範囲内における故障見逃し確率の最大値がもっとも低い多項式を示した。また，次数$m$が32のハミング符号の生成多項式（原始多項式）に基づくＬＦＳＲについて，故障見逃し確率の計算が困難になるため，故障見逃し確率の最大値の下界による評価を行った。そして，大きな重みの符号語が存在する場合に，その多項式とテスト長に対する故障見逃し確率が非常に大きくなることを示した。

## 論文審査の結果の要旨

集積回路の規模増大に伴い，その信頼性向上のため回路の自己検査を行なうことが重要になってきている。特に，自己検査を簡便に行なう一方法であるシグネチャ検査法が注目を集めている。シグネチャ検査法では，被検査回路の出力系列を線形帰還シフトレジスタ（シグネチャ回路）により圧縮し，圧縮結果が期待値に一致するか否かで故障の有無を判定している。従って，圧縮により故障を見逃すことがあり，その確率（故障見逃し確率）を評価することは重要である。故障見逃し確率を求める問題は，線形符号における誤り見逃し確率を求める問題に対応することが知られている。

本論文では，この事実に基づき，よく用いられるシグネチャ回路の故障見逃し確率を適当な仮定の下で，符号理論の手法を用いて解析している。故障見逃し確率は，対応する線形符号の重み分布が分かれば求まるので，原理的には常に計算可能ではあるが，実用的なシグネチャ回路に対してはパラメータが大きく計算が困難であることが多い。

まず，$2^m$入力シグネチャ回路のあるクラスの故障見逃し確率（最大距離分離符号の誤り見逃し確率に対応）が$2^m$元対称誤りモデルの下で，テスト長（符号長）に関して単調であることを示している。単調であることは，特定のテスト長において故障見逃し確率が非常に大きくなったりしないことを意味し，望ましい性質である。また，単一入力の場合に，遷移確率$\varepsilon$の２元対称誤りモデルにおいて誤り見逃し確率が誤りモデルの遷移確率$\varepsilon$について単調であるための必要条件を示した。これを利用して，テスト長が短い場合に，例えば，非零の係数が３個の原始多項式に基づくシグネチャ回路の故障見逃し確率が単調でないことも示している。

次に，同程度のハードウエア規模のシグネチャ回路の性能比較を行なっている。この問題は，シグネチャ回路の設計において重要な問題である。$m$入力シグネチャ回路を$d$個重ねた$d$重$m$入力シグネチャ回路レジスタと$dm$入力シグネチャ回路において$m$個の入力だけを用いる部分入力シグネチャ回路の２元対称誤りモデルにおける性能比較を行ない，遷移確率$\varepsilon$が比較的小さい場合，多重多入力シグネチャレジスタの方が部分入力シグネチャレジスタより

故障見逃し確率が低いことを示した。

一般に，現実の被検査回路において $\varepsilon$ の値を評価することは難しい。そこで，本論文では，$\varepsilon$ の適当な範囲における故障見逃し確率の最大値をシグネチャ回路の誤り特性の評価基準として提案している。そして，原始多項式に基づく単一入力シグネチャ回路の故障見逃し確率の最大値の下界を導出している。それを利用して，32次の原始多項式の場合に，現実的なテスト長（$10^4$～$10^6$ 程度）においても，原始多項式の選び方により，故障見逃し確率の最大値が極めて大きくなる場合があることを示した。

以上の結果は，シグネチャ検査法の性能評価，および誤り検出符号の誤り見逃し確率の研究へ寄与するところ大であり，博士論文として価値あるものと認める。