



布線検査法とその有効性についての評価*

古賀 義亮** 佐々木 勲**

Abstract

Automatic wiring check and fault location of disconnected wires for bare printed circuit boards without parts and backplane wiring become important for increasing reliability of digital equipments.

In this paper, a selection of the input terminal to minimize the number of wires masked by a certain disconnected wire is presented first for efficient test procedures and it is shown that an input terminal should be selected as the center of wiring moment. A step-by-step checking method and an AND/OR gate checking method are presented secondly for automatic wiring check to locate multiple discontinuity failures on wires, and several testing algorithms are shown. In the step-by-step checking method, it becomes clear that the failure modes are closely related to the test procedures, and the high effectiveness of the AND/OR gate checking method for fault location is proved by computer simulation.

1. ま え が き

電子機器システムの多様化、大型化と機器のコンパクト化にともない、機器のプリント板・バックパネル等の配線密度も増大しており、回路素子等を組み込む前の布線の検査はこれらの機器の高信頼性を保証するために重要となってきている。

布線検査が論理回路網における故障診断と違って異なる点は、検査にあたって方向性がないため任意の端子を入力点とすることができ、したがって配線は無向グラフとして表わすことができるということである。

論理素子等の故障診断では、有向性の性質をもつためマスクされて位置決定できない故障が存在することがあるが、布線検査では複数故障の位置決定も可能であって一般の故障診断という立場からみた場合も興味深い内容をもっている。

布線検査については、以前から行われていた配線図

と人手によるベル・チェックから、FACT (Flexible Automatic Circuit Tester)¹⁾などの開発により布線自動検査機による検査が主体となってきているが、その検査アルゴリズムはほとんど例外なく2点間テスト法が用いられており、検査の冗長性が大きくまた検査結果の処理にも時間がかかるなどの欠点がある。

W. H. KAUTZ²⁾はマルチプローブを用いた導通テストによる故障検出として Behavioral Testing と Structural Testing を提唱したが、布線検査において重要なマスク (検査信号が入力点に近い配線 (先行線) の故障によりこの配線より遠いところにある配線 (後行線) へ伝搬されないことをいう) による検査不能の配線を最小にするような入力点の選定についてはまだ検討されておらず、また故障位置の決定についてもまだ未解決のままである。

検査を効率よく行うためには検査信号を有効に利用することが必要であり、そのためには前述したような入力点の選定法が必要であるという観点から、この論文では、布線検査のための入力点の選定法について考察し、入力点は配線のモーメントの中心に選定すればよいことを示す。ついで検査効率をよくするため検査回数を短縮³⁾することを目的とした故障位置決定の

* Methods of Wiring Check and Evaluation of their Validity by Yoshiaki KOGA and Isao SASAKI (Department of Electrical Engineering, National Defense Academy)

** 防衛大学校電気工学教室

*** これに対し検査結果の処理時間を短縮することにより効率をよくする方法がある。

ため布線検査法として step-by-step 検査法および AND/OR ゲート検査法を提案する。これらの方法は内部で接続された任意の端子をもつクラスタすなわち木状配線の故障位置決定を外部端子から行う方法であり、検査回数を少なくするため故障検出検査を併用している*。さらに、

(i) 検査装置の基本的な構成と機能及び入力点の選定をも含めた検査手順。

(ii) step-by-step 検査法の中で故障モード数^{1),5)}と検査回数との関係。

(iii) AND/OR ゲート法について計算機シミュレーションを行い提案した検査法の有効性についての評価、などについて述べる。

なお本論文で用いる用語は参考文献 5) の定義に従う。

2. 布線検査のための入力点の選定方法

布線検査において検査信号の入力を与える入力点は任意の個数を選定し得るが、まずもっとも基本的な場合として、1 入力点を用いる検査法に適用できることを目的として 1 入力点の選定法について検討する。なお多数の入力点から検査信号を入れ、これを 1 箇所の出力点で検出する場合には入力・出力の関係は逆になるので入力点の選定法がそのまま出力点の選定法にあてはまる。

検査信号の入力点の選定は、その信号がある特定の配線の故障によってマスクされてしまうことをさけ、1 回の検査によりできるだけ多数の配線に信号が伝搬されて能率のよい検査を行うため重要である。したがって、実際の検査回数の短縮や検査結果の処理時間の短縮に先立ってまず適切な入力点を選定する必要がある。このために、入力点からの検査信号がマスクされにくいように選定する方法を提案する。これには配線を局部的にみて選定する方法と配線全体をみて選定する方法が考えられる。

(1) 最大次数点法 (Maximum Degree Point Method, MDP 法)

入力点の周りを局部的にみて選定する方法として、入力点に直接接続する配線 (検査は外部端子間で行うものとしているから実際は入力隣接節点に接続する配

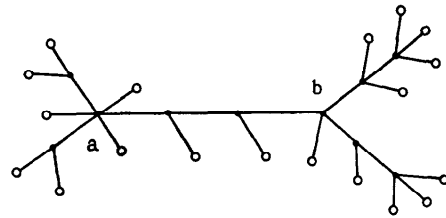


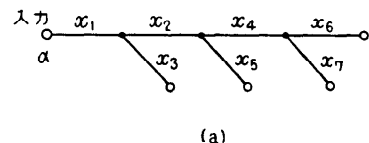
Fig. 1 Tree type wiring (a cluster).

線である。以下一次配線という。)の本数が最大になるような節点を選定する。すなわち最大の次数をもつ節点を入力隣接節点としこの節点上の外部端子を入力点とする方法である。このようにすれば、この節点から多数の配線がつながれているので一つの配線の故障によりマスクされる線数が少なくなる。この方法は入力点の決定も容易である。

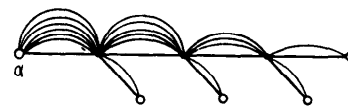
しかしながら、Fig. 1 のような配線においては、a 点を入力点とした場合 a 点の周囲の配線は一次配線の故障によりマスクされる割合は少ないが、b 点を中心とする周囲の配線は一次配線あるいはその後行線の故障によりマスクされる率が高く、この方法で選定した入力点が必ずしも適切な入力点とはいえない。そこで配線全体をみて選定する方法につき提案し検討する。

(2) モーメント法 (Moment Method, MOM 法)

いま Fig. 2(a) の配線において、先行線が後行線に対して故障検出上どのような役割を担っているかを量的に表すことを考える。配線 x_1 が故障したとき



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 An expression of masked wiring sets in terms of moments

* 故障位置決定にあたってはクラスタ内の部分木について故障の有無をチェックしながら検査を行う方が検査回数を短縮することができる。

の故障によりマスクされる配線を集合として表わすと、 x_1 自身も含めて $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$ でその要素数は7, x_2 が故障したときマスクされる配線は $\{x_2, x_4, x_5, x_6, x_7\}$ でその要素数は5, 以下同様に $\{x_3\}$, $\{x_4, x_6, x_7\}$, $\{x_5\}$, $\{x_6\}$, $\{x_7\}$ で要素数はそれぞれ1, 3, 1, 1, 1となる。複数個同時に故障した場合は先行線の故障の場合に含まれる。これらの要素数を故障配線の上に要素数に等しい数の弧を記すと Fig. 2 (b) のようになる。それぞれの弧の数は、 α 点から検査信号を入れたときの後行線に対する配線の役割の程度を表わしていると考えられ、これらの弧の数の和は α から信号を入れたときの Fig. 2 (a) の配線の全体の役割を表わしているといえる。そこでこの配線において、任意の2節点間にある配線の数をもって距離を表わし、各辺に重み1をつける。これは等価的に各節点の位置に集約されて重み1がつけられたものと考えることができる。このとき、 α 点を支点とし距離 i の節点 v_i のモーメントは i となるから、これを距離 i で等分して α と v_i 間の i 個の辺上に1本ずつ弧を画く。このようにすると Fig. 2(c) のようになる。Fig. 2 (b) と (c) の弧数を比較するとこれらは等しく (b) の役割の程度はモーメントで表現できることがわかる。

一般に、木グラフ $G=(V, E)$ ($V \neq \phi$) は節点をその要素とする集合、 E は $V \cap E = \phi$ なる集合で辺をその要素とする) 上の節点 v_i, v_j 間の距離*を $d(v_i, v_j)$ (すべての v_i に対して $d(v_i, v_i)=0$) とし、グラフ上の各辺に上にのべたと同様に重みをつけると、この距離と重みからモーメントはつぎのように表わされる。木グラフ G の部分木 $G'=(V', E')$ 上の節点を $v_i' (v_i' \in V')$ とすると、 V' 中の任意の一節点 v' に隣接し、 $v_0 \in V'$ なる点 v_0 のまわりの G' のモーメントは、

$$M(v_0) = \sum_{v_i' \in V'} d(v_0, v_i') \quad (2.1)$$

である。

木グラフ G として表わされる配線において、マスクによる検査不能の配線を最小にするためには、配線のモーメントと故障によりマスクされる配線数が等価であることから、モーメントを最小にするような点を入力点として選べばよいことが明らかである。すなわち、木グラフ $G=(V, E)$ の節点 v_0 がその G 上の任意

の節点 $v_0 (v_0 \in V)$ と空でない集合 V_α に分割されたとすると、つぎの式を満足するような節点 v_0 を選定する。

$$F(v_0) = \min_{v_i \in V_\alpha} \sum d(v_0, v_i) \quad (2.2)$$

$$V_\alpha \cup \{v_0\} = V$$

この v_0 をモーメントの中心という。したがって、この方法は配線のモーメントの中心を入力隣接節点とし、入力隣接節点上の外部端子を入力点とする方法である。

マスクによる影響をもっとも少くする入力点の与え方はモーメントの中心を入力点とすればよいことが明らかとなったが、一般にこのモーメントの中心を求めるためにはすべての節点について (2.2) 式の計算を行って求めなければならない。ところがこれには非常に多くの計算を必要とするので、つぎに簡単にモーメントの中心に近い節点を選定し、これらの節点に式 (2.2) を適用してモーメントの中心を求める手順を Fig. 3 (次頁参照) のフローチャートに示す。

この手順によってモーメントの中心すなわちもっともマスクされることが少ない入力節点と与えられる。

3. 故障位置決定のための布線検査法

一般に布線検査においては、大きくわけて Fig. 4 (a) (次頁参照) に示すような順序テストによる手法と (b) のテスト解析による手法とが考えられ、さらに (b) はテスト結果の処理について (i) 故障表により処理する方法と (ii) 処理アルゴリズムによって処理する方法とにわけられる。しかし、(b-i) の手法による場合配線の辺の数を k とすると一般に同時に生じる多数の故障を考えると 2^k に対する故障表が必要となり布線検査に適した手法とはいえない。(b-ii) の手法についてはテスト入力をもっとも最小にする方法などを含めて今後検討しなければならない点が多く、この論文では (a) の順序テストによる手法を用いる。

故障位置決定のための検査法としてまず step-by-step 検査法を提案し、この中で故障モード数と検査回数の関係について考察する。ついで AND/OR ゲート法による検査法についてのべる。

このとき、各検査法の検査装置はつぎのような共通の基本的機能をもつものとする。

- (i) 故障がある場合、故障検出のための正常テストから故障位置決定のためのテストへ移行することができる。
- (ii) 故障がない場合、正常テストを続行できる。

* この距離は木グラフ上の節点 v_i と v_j を結ぶ連鎖の中に含まれている辺の個数で定義し、物理的な線の長さを示したものではない。

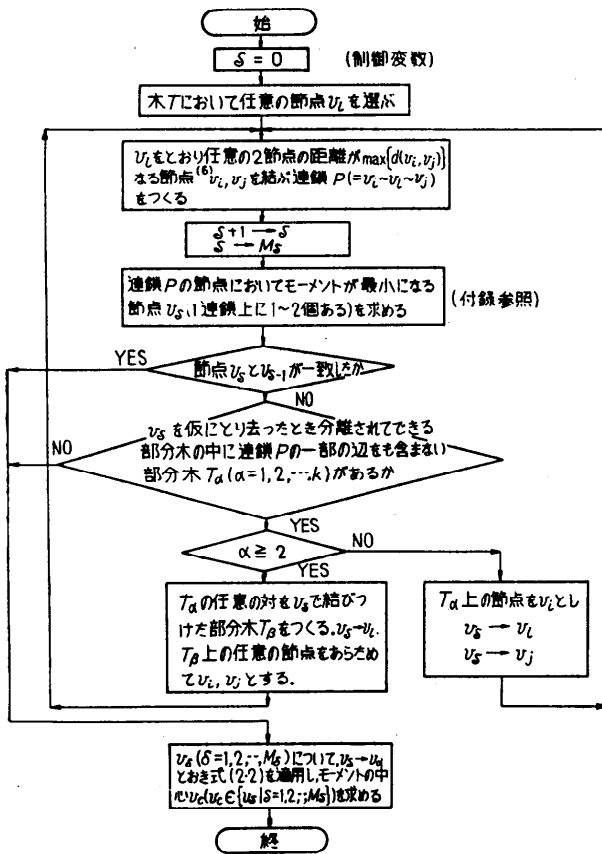


Fig. 3 Flow chart

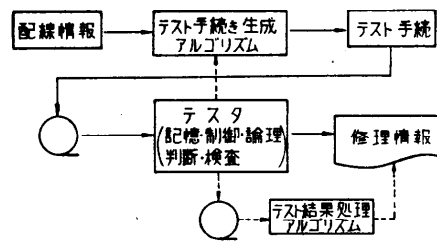
(iii) 検査対象配線の出力端子で AND 演算あるいは OR 演算 (Fig. 5) を行うことにより配線の多数の辺上の故障検出あるいは任意の辺の故障位置決定ができる。

とくに (iii) は配線のテストを行う上で重要な機能であり, このような機能をもつテストを設計することが能率のよい故障位置決定検査のためには必要である。

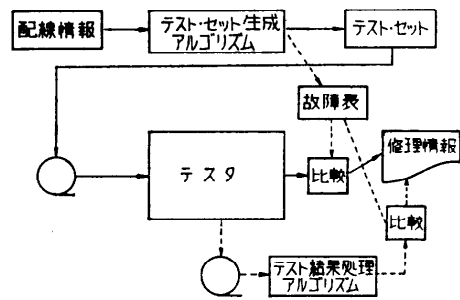
3.1 Step-by-step 検査法

すでに transmission line の配線モードおよび故障モードについて検討し, すべての故障モードを生成するアルゴリズムを見いだして故障モードを表に並べあげたが⁵⁾, step-by-step 検査法はこれらの transmission line の配線モードとこれから生成される故障モードを利用して順序テストにより検査する方法である。

この step-by-step 法を用いた transmission line の検査は配線の性質から line の端を入力点を選び配線の通りに沿った検査を行うものとし, 前節に述べた



(a) 順序テストによる手法



(b) テスト解析による手法

Fig. 4 wiring check methods

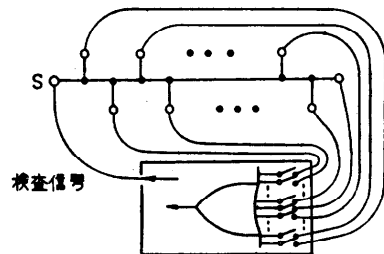


Fig. 5 OR operation of test equipment

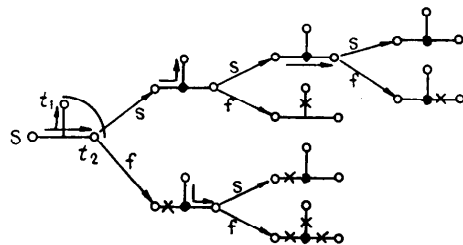


Fig. 6 Step-by-step tests for three terminal line

入力点の選定方法は適用しない。入力点の選定方法は後で述べる AND/OR ゲート法に適用している。

テストの生成法は, すべての可能な故障モードを生成したのと同様な方法により与えられる。いま Fig. 6 に示した 3 端子 (n=3) をもつ transmission line

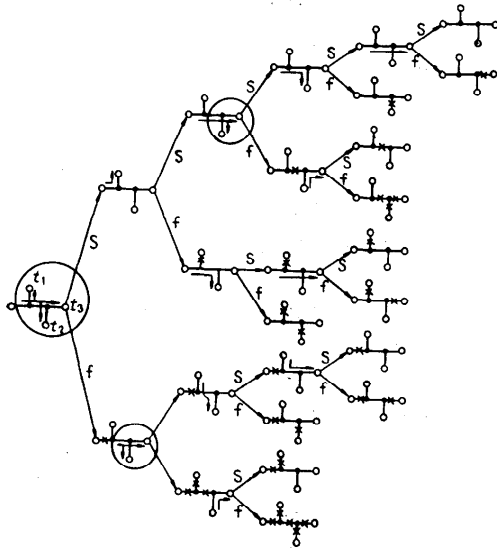


Fig. 7 Step-by-step tests for terminal line

の故障を検出しその位置を決定するために、つぎのような手順で検査する（2端子の場合は簡単に検査できる）。

（手順1）検査信号の入力端子（ソース端子） s と端子 t_1 および t_2 間の故障をそれぞれ OR 演算で検査する。

（手順2）検査が正常のとき（1という入力信号が1という出力信号として検査されるとき）、端子 t_1 および t_2 を検査する。検査が異常のとき（1という入力信号が0という出力信号として検出されるとき）、ソース端子は故障とみなし、入力点を端子 t_1 にとり t_1 から t_2 への故障を検査する。

Fig. 6 に以上の手順による step-by-step 検査法を用いた配線の故障の有無および故障位置決定の過程が示されている。

Fig. 7 に3端子の場合の拡張として4端子 transmission line の検査を示す。まず端子 t_2, t_3 が共に接続され、単一の端子として t_1 とともに OR 演算で検査される。検査が正常のとき、 s から t_1 の検査が行われる。検査が異常のとき、ソース端子が故障と判断される。ついで $n=3$ の検査が t_1, t_2 および t_3 について行われる。

同様の手法が任意の n に対して拡張される。Fig. 8 に示すように transmission line の最右端配線に故障のない故障モードを $\alpha(i) (i \leq n)$ とすると、 $\alpha(i)$ は2回の検査を必要とし、最右端線に故障のある故障モー

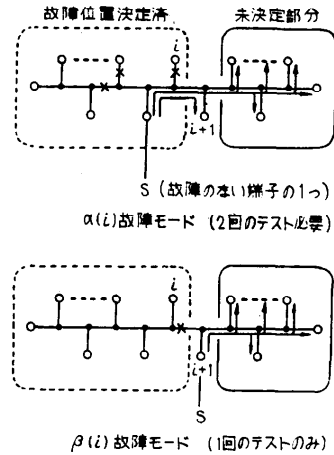


Fig. 8 Test generation algorithm

ド $\beta(i)$ は1回の検査を必要とする。そこで、 $\alpha(i)$ モードの検査に必要とするテスト数を $t(i)$ 、 $\beta(i)$ モードの検査に必要とするテスト数を $d(i)$ 、また故障モードの総数を $c(n)$ とすると、すべての可能な故障位置を決定するためのテストの総数 $p(n)$ はつぎのように与えられる。

$$p(n) = \sum_{i=2}^{n-1} \{2t(i) + d(i)\} + 1 = c(n) - 1 \quad (3.1)$$

ただし、 $n \geq 3$ である。

このテスト生成法は故障モード解析のアルゴリズムに従っているからテストの総数は次式のようにになる。

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{5}} \left\{ \left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^{2n-1} - \left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^{2n-1} \right\} - 1 \quad (3.2)$$

Table 1 に $t(n)$ 、 $d(n)$ 、 $c(n)$ および $p(n)$ を示す。

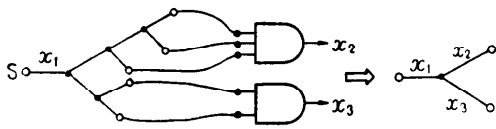
3.2 AND/OR ゲート検査法

AND/OR ゲート検査法は、2. で述べた方法によって入力点を定め、さきに検討したこの入力点を基準とする配線モードの分類⁵⁾を利用し、AND ゲートと OR ゲートを用いて順序テストにより検査する方法である。

故障の位置を決定するためには前の step-by-step

Table 1 Number of total tests.

外部端子数	2	3	4	5	6	7	...
$t(n)$	1	3	8	21	55	144	...
$d(n)$	1	2	5	13	34	89	...
$c(n)$	2	5	13	34	89	233	...
$p(n)$	1	4	12	33	88	232	...



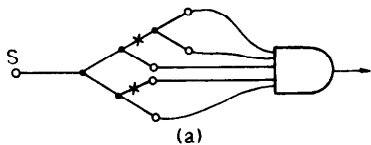
(a) グループごとのAND演算

(b) 結果処理のための真理値表

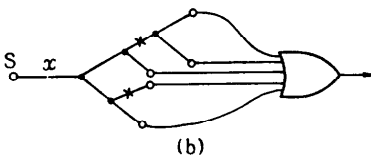
出力		判定された故障位置
x_2	x_3	
0	0	x_1
0	1	x_2
1	0	x_3

Fig. 9 A method of fault Location by using AND gates

検査法で用いたようにいくつかの端子をまとめてグループにして検査を進めていくことが考えられる。グループを利用して配線の故障の位置をゲート回路を用いて決定する手法には、情報検索で用いられているバイナリサーチと同様な方法として Fig. 9 (a) に示すように2つのグループにわけそれぞれのグループごとにAND演算を行いその結果を Fig. 9 (b) のように処理して故障位置を定める手法と、Fig. 10 (a) のAND演算で故障が検出された配線について Fig. 10 (b) に示すように複数のグループの出力信号のOR演算を行いその出力信号から、入力信号の検査上各出力端子に共通な配線 x (位置は配線情報から既知) の故障位置を決定しようとする手法の2つがある。前者は単一故障の場合には簡単に故障位置が決定できるが、複数故障の場合結果の解析が必要であって最終的な位置決定までの手順は複雑となる。後者はORゲ



(a)



(b)

Fig. 10 A failure check method by using AND gate and a method of fault Location by using a OR gate

トの出力信号の判別だけで特定の位置の故障の有無が定められ、OR演算であるため他の部分に存在する可能性のある複数故障の影響はほとんどない。したがってここでは後者の手法を用いる。この手法の場合複数個のグループは最小2個のグループでよいので、出力端子を2つのグループにわけけるわけ方についていくつかの手法をまず提案する。

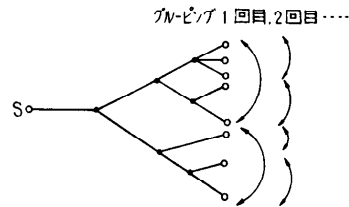
3.2.1 グループING法

(1) 分岐グループING法 (Fig. 11 (a))

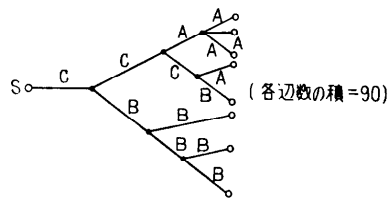
入力端子から各出力端子方向に向かって配線の分岐点において2つのグループにわけていく方法であり、分岐タイプあるいは混合タイプの分岐部分の配線に適している。

(2) 等荷重グループING法 (Fig. 11 (b))

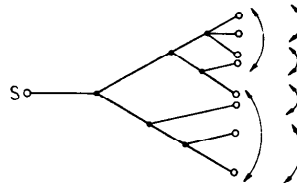
各グループごとの重み、すなわち配線をグラフで表わしたときの辺数が等しくなるようにグループとしてまとめる方法である。これは Fig. 11 (b) に示すように配線を A, B, C のグループ (出力端子は A と B の2つのグループ) にわけ、これらのグループの要素数すなわち辺数の積が最大になるわけ方に等しい。ここに C グループは A グ



(a) 分岐グループING法



(b) 等荷重グループING法



(c) 等出力端子グループING法

Fig. 11 Grouping methods

ループとBグループの共通節点と入力端子（あるいは入力端子に相当する端子）を結ぶ連鎖上の辺をその要素とするグループであり、A、BはC以外の辺を2分したそれぞれのグループである。この方法はラインタイプのような分岐する辺数が不均一になっている配線モードに適している。

(3) 等出力端子グルーピング法 (Fig. 11 (c))

各グループの出力端子数が等しくなるようにグループわけする方法であり、縮退化木状配線のように出力端子数と入・出力端子以外の配線数の割合がほぼ等しい配線においては等荷重グルーピング法と同じような効果が期待され、グループ化が簡単であるため実際の検査に適している。

3.2.2 検査法

つぎに複数個の断線がある場合にも適用されるAND/OR ゲート検査法の検査手順について述べる。

Fig. 12 にその布線検査装置の検査部分のモデル図を示した。検査手順はつぎのとおりである。

(手順1) 配線データから1つのクラスタについて入力点を選ぶ。

(手順2) 入力点から検査信号を入れ、Fig. 10 (b) のように AND ゲートですべての出力点の出力のAND 演算を行い故障の有無を検査する。検査が正常のときは手順1へ、異常のときはつぎへ。

(手順3) OR ゲートで Fig. 10 (b) の OR 演算を行い検査が正常のとき手順4へ、異常のとき x の位置が故障位置であると判定し、 x の入力端子から最短距離にある外部端子を入力点としつぎへ。

(手順4) 配線データから配線のタイプを決定し Table 2 に従いグルーピング法を選定して配線をグループわけする。各配線グループごとに手順2へ。

以上の手順を繰り返し実行し検査を完了する。

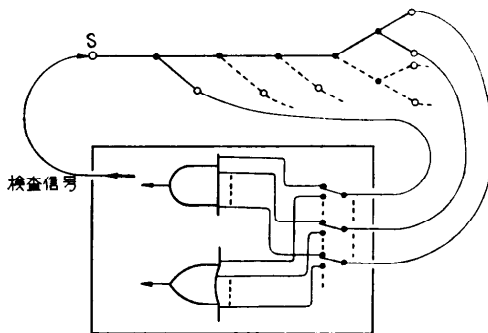


Fig. 12 A wiring check equipment

Table 2 Correspondance of wiring modes with grouping methods

	配線モード	グルーピング法
1	ラインタイプ	等荷重または等出力端子グルーピング法
2	分岐タイプ	分岐グルーピング法
3	混合タイプ	ライン部分と分岐部分の大小により1または2

4. 布線検査法のシミュレーションとその有効性についての評価

前章に提案した AND/OR ゲート法による検査の有効性を調べるためにシミュレーションを行ったのでその概要と結果について示す。その方法は、(i)検査対象となる配線を行列の形で表現しこれに乱数により任意に故障を挿入し被検査配線とする。(ii)テスト手順生成手順によりテスト手順を生成する。(iii)AND/OR ゲート法にもとづいて検査を実行し故障位置を決定するまでの検査回数ならびに修理情報を得る。NEAC-2200/575 を使用し、検査対象配線として 20 種の配線を作成しシミュレーションを行った。結果の一例を Fig. 13(次頁参照) に示している。また従来の 2 点間テスト法により故障位置を決定する場合と比較するため対象配線の平均検査回数を求めると Fig. 14 のようになる。この図からわかるように配線の故障率が α より小さいときには AND/OR ゲート法が単位配線当りの検査回数が少なくすむ、 α より大きいときは 2 点間テスト法の方が検査回数が少なくすむ。このことは配線の故障の割合が増大すると、AND/OR ゲート法のように故障検出を併用して故障位置決定に必要な手数を減少させる方法においては、故障検出テストによって故障位置決定検査 (OR 演算) を省略できる配分が少なくなり故障検出テストが冗長な検査となるからである。実際の配線においては、配線の故障率は過大に見積っても 10% 以下と考えられるからこの範囲においては AND/OR ゲート検査法は効率のよい検査法であるといえる。

なお故障率を 0%~100% まで仮定したときの各検査法の故障位置決定のための検査回数の限界はつぎのようになる。step-by-step 検査法では n 個の端子をもつ transmission line の配線において検査回数を t_s とすると、

$$n-1 \leq t_s \leq 2n-3$$

である。また AND/OR ゲート検査法では入力端子を 1、出力端子 n_0 、辺数を n_e とし検査回数を t_s とすると、

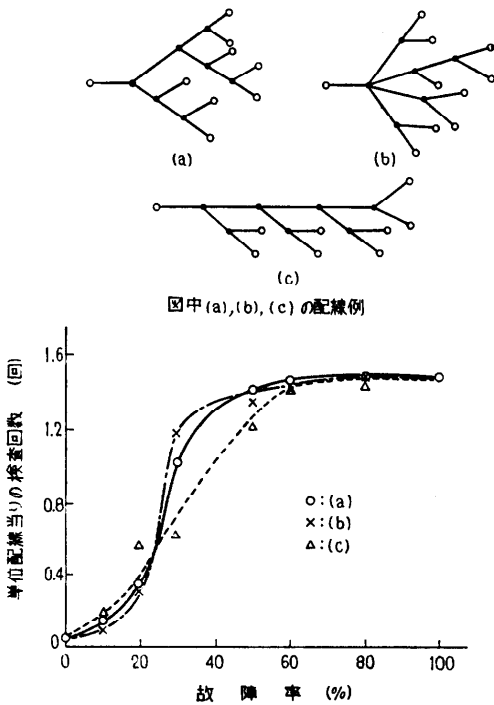


Fig. 13 Example of wiring and test results.

$$1 \leq t_e \leq 2n_e - n_0$$

であり、最小値は辺数・出力端子数に無関係となる。

5. むすび

システムにおける配線品質の良否はシステム全体の信頼性に大きなウェイトを占め、配線品質を高度に保つための布線検査も高品質・高速度で行うことが必要となっている。布線検査における故障検出については報告がなされているが、故障位置の決定については未解決な点が多く効率のよい検査法が望まれている。

本論文では布線検査の特徴である検査の無向性を前提として木状配線であるクラスタ内の故障位置決定検査について検討した。その結果、検査信号の入力点としては配線のモーメントの中心が適していることがわかり、また故障モード数と検査回数との間にも密接な関係があることを示した。提案した AND/OR ゲート検査法については故障率の低いいわゆる実際の配線検査では検査回数が少なく有効な検査法であることを明らかにした。

布線検査は検査上の諸制約が少なく、論理回路などの故障診断とは異なった一面をもっており、故障診断

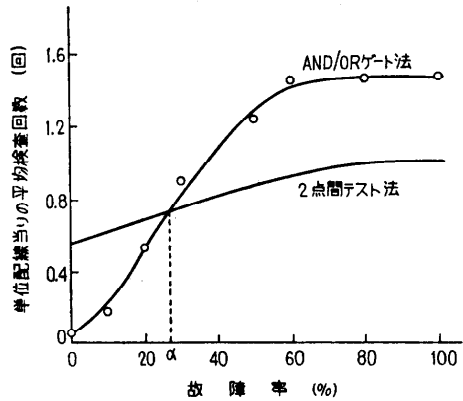


Fig. 14 Comparison of mean numbers of tests for the AND/OR gate method with one for the two-point test method.

をより幅広く考えていく上に一つの手がかりを与える可能性のある分野である。上に述べた無向性のほかに、短絡検査はここで提案した手法と双対な方法などによって行うとか、一般的なテストポイントの設置条件、検査回数と故障数との関係など今後解決すべき点が多い。

おわりに、日頃御指導いただいている防衛大学校丹羽義栄教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) Y. KOGA: A Checking of Wiring, 7th Design Automation Workshop Proceedings pp. 173~177 (1970).
- 2) 菅原: 自動配線試験機 FACT, 日本アビオトロニクス技報, No. 1, pp. 35~43 (1970) など.
- 3) 古賀, 佐々木: 木状配線の理論的解析とその自動布線検査について, 情報処理学会設計自動化研究 74-14 (1974).
- 4) W.H. KAUTZ: Testing for Faults in Wiring Networks, IEEE Trans. on Computers, Vol. c-23, No. 4 (April 1974).
- 5) 古賀, 佐々木: 布線自動検査のための配線モードおよび故障モードに関する理論的解析, 情報処理, Vol. 16, No. 1, pp. 30~38 (Jan. 1975).
- 6) W.F. SMYTH, W.M.L. BENZI: An Algorithm for Finding the Diameter of a Graph, Information Processing 74 (pp. 500~503). North-Holland Pub. Co., Sweden, (1974).

(付録次頁につづく)

(昭和49年11月7日受付)

(昭和50年11月14日再受付)

付録 連鎖上の最小点を求める手順

