

押田 尚, 巽 久行, 徳増 眞司
神奈川工科大学 工学部 情報工学科

1. はじめに

組合せ論理回路を階層型ニューラルネットワーク（以下、NNと略す）として捉えて、論理回路の故障診断を簡単に行うシステムを、文献[1]で報告した。本報告はこの続報であり、ここでは回路内の対象とする素子が故障素子であるための必要条件を求めている。この必要条件を用いたアルゴリズムにより、文献[1]では処理が困難であった比較的大きな論理回路の故障診断も可能となっている。しかしながら、本手法の特徴である診断前に特別なテストパターンの用意も故障辞書も必要としないのは変わらない。

2. 論理素子と等価なNN素子

文献[1]と重複するので、必要事項を概略で示す。最初に、既存の論理素子を含む表1に示されたすべてのタイプと等価なNN素子を作成する。この意図は、2値論理の範囲内で表現できる任意の論理素子を定義できる点にあり、素子の配置誤りやファンイン・ファンアウトでのs-a-0/1のような故障を扱うことが可能となる。我々が考察している故障診断は、このNN素子を用いて論理回路と等価なNN回路をサンプルNN回路として構成し、このサンプルNN回路と異なったタイプのNN素子を持つ検査回路に対して、故障原因となったNN素子の位置とタイプを特定するものである。これを行うために、あらかじめ次の3つを仮定している。

- (a) 検査回路は、組合せ論理回路のみとする。
- (b) 検査回路を構成する各NN素子は、高々2つのファンインと唯一つのファンアウトを持ち、各ファンアウトは高々2つの後続NN素子に結合されるものとする。すべてのNN素子は階層型NNで構成され、誤差逆伝搬法で学習されたNN素子は表1の16種類のタイプ（%0～%15）のいずれかである。また、NOT素子はNOR素子（%1）の特別な場合として定義する。
- (c) 考察する故障は、回路の接続構造（トポロジー）は保ちつつ、回路内のただ1つのNN素子が表1に示す16種類の中の別のタイプのNN素子に変化したような故障のみとする。

表1 16種類のタイプのNN素子

Input		Gate type							
I1	I2	%0	%1	%2	%3	...	%13	%14	%15
0	0	0	1	0	1		1	0	1
1	0	0	0	1	1	...	0	1	1
0	1	0	0	0	0		1	1	1
1	1	0	0	0	0		1	1	1
Gate name		s-a-0 NOR						OR s-a-1	

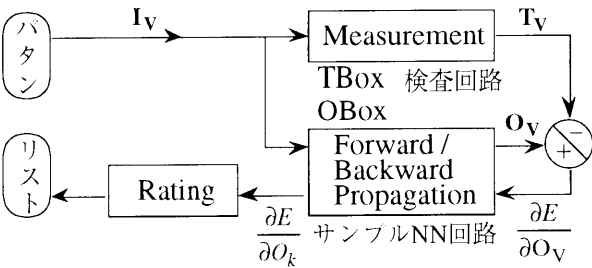


図1 検査ダイアグラム

3. NN回路の故障診断アルゴリズム

検査手順は、図1に示すように形式化される。図中、サンプルNN回路はまるで診断エンジンのように働き、これに続くレーティング（Rating）へ故障素子のデータを提供する（レーティングは2段階からなる）。図1においてTBoxおよびOBoxは、それぞれ対象としている検査回路および対応するサンプルNN回路を示し、最初にテストパターン I_V に対して、それぞれ T_V および O_V を出力する。このときOBox内では、前方伝搬計算を行う関数Forward()と数値誤差の補正として0/1に正規化した O_k をもとに、最終的な O_V が決定される。そして感度因子 $\partial E / \partial O_V = O_V - T_V$ が決定された後、後方伝搬計算を行う関数Backward()に従って、感度因子 $\partial E / \partial O_k$ が計算され解析される過程で、故障素子の位置検出と故障タイプのレーティングが行われる。このとき、関数Backward()は繰り返しのない唯一回の逆伝搬でレーティングが行えるのが特徴である。

検査回路に含まれる故障素子がただ1つであると仮定して、その素子の位置と誤ったタイプを特定する場合、検査回路は入出力パターンがサンプルNN回路と不一致となる場合が存在することが前提である。全ての入出力パターンが一致するならば、内部の任意の素子がサンプルNN回路の対応する素子と一致しなくとも、回路自身を故障とは見なさない。

この前提のもとで、対象とする素子が故障素子であるための必要条件が存在することを示す。ここで、サンプルNN回路と検査回路に同じ入力信号パターン $I_V = (I_i)$ を与えたとき、それぞれ出力信号パターン $O_V = (S_j)$ と $T_V = (T_j)$ が得られ、互いに不一致（ $O_V \neq T_V$ ）であるとする。また、このとき回路内のある素子 k のファンインを (N_{k_1}, N_{k_2}) 、ファンアウトを O_k とする。

いま、素子 k が故障素子であり、サンプルNN回路の素子 k の入出力パターン $(s_{0,0}, s_{1,0}, s_{0,1}, s_{1,1})$ に対して、検査回路の素子 k の入出力パターンは $(t_{0,0}, t_{1,0}, t_{0,1}, t_{1,1})$ を持つものとする。仮定により、 $s_{i,j} \neq t_{i,j}$ となるファンイン (i,j) が少なくとも1つ存在する（但し $s_{i,j}$ および $t_{i,j}$ は、 $\{0,1\}$ のいずれかの値をとる）。このとき次のことがいえる。

【条件1】 $s_{i,j}=t_{i,j}$ であれば、 $(N_{k_1}, N_{k_2}) \neq (i, j)$ である。即ち、不一致パターンの信号に関しては、素子 # k のファンインに (i, j) は現れない。

(証明略) 背理法より明らか。 □

条件1より、以下 $(N_{k_1}, N_{k_2}) = (i, j)$ とし、そのときのサンプルNN回路の素子の出力を O_k とする。また誤差関数 $E = \sum_m E_m = (1/2) \cdot \sum_m (S_m - T_m)$ とする。

【条件2】 $(s_{i,j}, t_{i,j}) = (1, 0)$ ならば $\partial E / \partial O_k > 0$,

$(s_{i,j}, t_{i,j}) = (0, 1)$ ならば $\partial E / \partial O_k < 0$ が成立する。

(証明) (A) $(s_{i,j}, t_{i,j}) = (1, 0)$ とする。このとき、 $O_k \geq s_{i,j} (=1)$ である。いま $O'_k = O_k - \delta O_k$ とし、# k のファンアウトの値 O_k を微量 $\delta O_k (> 0)$ だけ変更したとき、NN素子の出力は $(0, 1)$ の範囲にあり、その4隅周辺における挙動は単調である。仮定により、 $E > 0$ であるので、少なくとも1つは $S_m \neq T_m$ である。

(a1) $S_m > T_m$ 、即ち $(S_m, T_m) = (1, 0)$ とする。 $S_m = 1$ だから O'_k に対して、 $S'_m = S_m - \delta S_m$ ($\delta S_m > 0$) となる。従って $E_m = (1/2) \cdot (S_m - T_m)^2$ に対して、

$$\frac{\partial E_m}{\partial O_k} = (S_m - T_m) \cdot \frac{\partial S_m}{\partial O_k} = \frac{\partial S_m}{\partial O_k} = \lim_{\delta O_k \rightarrow 0} \frac{S'_m - S_m}{O'_k - O_k} \\ = \lim_{\delta O_k \rightarrow 0} \frac{(-\delta S_m)}{(-\delta O_k)} = \lim_{\delta O_k \rightarrow 0} \frac{\delta S_m}{\delta O_k} > 0$$

(a2) $S_m < T_m$ 、即ち $(S_m, T_m) = (0, 1)$ の場合、 $S_m = 0$ だから O'_k に対して、 $S'_m = S_m + \delta S_m$ ($\delta S_m > 0$) となる。以下、(a1)と同様にして $\frac{\partial E_m}{\partial O_k} > 0$ がいえる。

以上、(a1)および(a2)より、 $\partial E / \partial O_k = \sum_m \frac{\partial E_m}{\partial O_k} > 0$ 。

(B) $(s_{i,j}, t_{i,j}) = (0, 1)$ とする。このとき、 $O_k \leq s_{i,j} (=0)$ である。いま $O'_k = O_k + \delta O_k$ とし、(A)と同様に、# k のファンアウトの値 O_k を微量 $\delta O_k (> 0)$ だけ変更したとき、以下は(A)と同様にして、 $\partial E / \partial O_k < 0$ となることが分かる。 □

4. 実験結果と検討

故障診断は、1bit ALU 回路および8bit Adder 回路内の任意の1素子を故障させて実験を行った。図2に、実験で用いた8bit Adder 回路の一部を示す。また表2に、故障診断結果の一部を示す。この結果は、図2内の素子番号11を故障として、OR素子(%14)の代わりにAND素子(%8)に置き換えた場合の診断を示している。

表2において、第1次レーティング (Primary) は各素子位置の故障可能性を示すRating値と、その故障を引き起こした変化素子タイプ (Gate type) が示される。この例の場合、Rating値100の17個の素子が、故障を起こした可能性のある候補素子として挙げられている。次に第2次レーティングは、実際に回路内を第1次レーティングで選定された故障候補素子 (Gate type) で置き換えた場合のRating値が示される。この例の場合、素子番号11の素子をタイプ%8(AND)に変化させた場合が最も高いRating値をとるので (Rating値100は誤差0の決

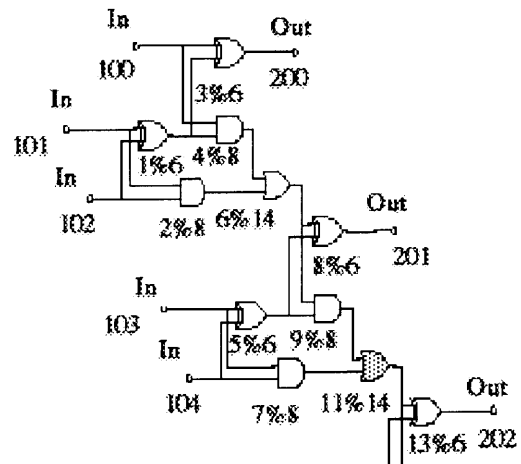


図2 8bit Adder回路 (一部)

表2 シミュレーション結果

Rating & type	Gate #11 : OR(%14) → AND(%8)							
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Primary	100	100	0	100	100	100	100	0
Gate type	%0	%0	%6	%0	%0	%8	%0	%6
Secondary	-11	-		2	-	-	-	
	途中省略							
	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16
Primary	100	100	100	0	100	100	100	100
Gate type	%0	%0	%8	%8	%12	%0	%4	%12
Secondary	31	-	100		35	-	-	23
	途中省略							
	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23	#24
Primary	0	100	100	0	100	0	100	0
Gate type	%8	%12	%0	%6	%12	%8	%4	%8
Secondary		11	5		5		5	
	途中省略							
	#33	#34	#35	#36	#37	#38	#39	#40
Primary	0	0	0	0	0	0	0	0
Gate type	%6	%8	%6	%14	%8	%6	%8	%14
Secondary								

定である)、この素子番号11の位置で提示されたタイプ故障が起こった可能性が最も高いと結論付けている。

5. おわりに

階層型NNの故障検査性の研究として、組合せ論理回路の故障診断を考察した。本手法は、直ちに実用的な故障診断に活用できるものではないが、回路内に存在する1つの故障素子をほぼ確実に発見する極めて強力なものであり、診断前の特別なテストパターンの準備も誤り辞書も必要としない点は魅力的である。今後、本手法を多値論理回路の故障診断、臨床診断、学習の成果検証や経済の動的解析などに応用させることを考えている。

参考文献

- [1] 高木, 巽, 徳増: ニューラルネットワークによる論理回路故障診断. 情報処理学会第59回全国大会, 1J-8, Vol. 2, pp. 43-44 (1999).
- [2] H. Tatsumi, S. Tokumasu: "An application of neural networks for logic circuit diagnosis". Proceedings of Third International Conference on Engineering Design and Automation, EDA'99, pp. 412-419 (1999).