

# 信頼度を導入した自己修復型センサネットワーク

## Sensor Network Based on Mutual Communications With Reliability Index

東京大学	藤原 健	Takeshi FUJIWARA	Student Member
東京大学	高橋 浩之	Hiroyuki TAKAHASHI	Member
東京大学	中沢 正治	Masaharu NAKAZAWA	Non-Member

**Abstract** In an environment such as outer space where we cannot maintain the artifacts, it is the robustness that is important for artifacts. Thus the system, which has the information processing circuit realizing self-maintenance function is desirable. So far some approach is tried to realize self-maintenance function using the qualitative reasoning technique. In this study, we try to apply distributed information processing technique to this qualitative reasoning information processor, by arranging many operating homogeneous units onto an application specific integrated circuit(ASIC). Now we are investigating the way of mounting the self-maintenance logic on a large-scale sensor network

**Keywords:** Self-maintenance Sensor network, Distributed processing, ASIC, FPGA

### 1. 緒言

インターネットをはじめとする各種ネットワークの発達により、情報流通の利便性は格段に向上した。しかし、実世界の時々刻々変わる環境情報の取得や、広域にわたる情報の同時把握については、新たな技術開発の余地が残されている。その中でも、センサネットワークは、これまで工場や化学プラントなどの特殊な場所での利用が主であったが、センサの小型化やネットワーク環境の整備が急速に進んだことにより、利用する場所がより広範囲になり、より我々に身近なアプリケーション例も検討されつつある。それに従い、人手介入なしで、センサネットワーク間の連携により、面的な拡がりを実現するものが求められるようになった。例えば宇宙空間における人工衛星に搭載されるセンサ群は、そのメンテナンスが非常に困難を極めるため、このような状況においてはセンサのロバスト性がセンサネットワークの効用を大きく左右する重要な要素となってくる。しかし原理的に故障を伴わないセンサを実現することは不可能であるので、故障の発生を前提とした上で故障に耐性のあるセンサネットワークという概念が提唱されるようになった。センサネットワークが故障に耐性をもつためには故障が発生してもシステム全体の機能を保持し続けることができる修復

機能をもつことが望ましい。自己修復機能とは、故障判定、故障診断、修復計画、修復実行を自動的に行う機能のことである。自己修復型センサネットワークはこれらの機能を実現するために、定性物理に基づくモデルベース推論を用いており、これを用いることで、理論的には対象機械システムを記述した対象モデルを得ることができれば、あらゆる機械システムに自己修復機能を付加することが可能になる[2]。これはネットワークの演算部がセンサ群から得られた情報を処理することで実現される。

従来はセンサネットワークに情報処理部に CPU を用いることが検討されてきた。しかし人工物の規模が大きくなるにつれて自己修復機能の実現に必要な情報の収集ならびに物理モデルに基づいた各部の健全性把握のために必要な演算量が増大し、演算をいかに効率よくするかが課題となっている。こうした背景から、演算処理の負担を軽減するためにモジュール方式が提案されているが[4]、よりきめ細かい処理や多数の部品から構成される人工物に対してはモジュール方式でも対応できず、分散型の情報処理回路による並列演算を行うことが有効であると考えられる。本研究では、多数の光センサ群からなる形状・移動検知センサネットワークに自己修復機能を持たせ、それらの情報処理部を専用回路(FPGA, CMOS ASIC)にて実装した。

### 2. 自己修復アルゴリズムの設計

連絡先: 藤原 健、〒113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16、東京大学システム量子工学専攻中沢研究室、電話: 03-5841-6974、fujiiwara@sophie.q.t.u-tokyo.ac.jp

## 2.1 自己修復機能

本自己修復機能を実現するには、人工物の故障を検知しなければならない。情報処理回路は、人工物の挙動をモデル化し、人工物の各部分から得られた情報とそのモデルの間の関係を判断することによって故障を検知する。

## 2.2 定性推論

定性推論とは現象の定性的な側面に注目して推論を行っていくものである[1]。例えば空気に関して、 $PV = nRT$  という式と現在の温度と圧力から、体積を厳密に求める方法を定量的推論とすると、定性推論では「Tが増えればVも増える」「 $T \uparrow \Rightarrow V \uparrow$ 」とより抽象化して推論を行う。自己修復機能に必要なのは故障部分を推定することであり、特定の部分に関する厳密な情報ではない、よって定性推論が有効に用いられてきた。

## 2.3 回路の構想

一般的な（ノイマン型の）計算機は処理装置及び主記憶装置から成り立つ。一方、定性推論型の演算を行うための装置について考えてみると、ここの演算それ自体は大まかなものでよく、それほど高い性能は求められない。すなわち定性推論演算においては演算の種類がある程度限定されるので、現在の標準的なCPUの能力を生かしきれているとは言い難い。また定性推論演算においては扱う情報のサイズも定量的演算に比べてかなり小さくなるので現在の標準的なメモリでもオーバースペックである。しかし、人工物が複雑になればなるほど物理モデルは複雑化し、その演算の量は極めて多くなり、既存のCPUでは計算が追いつかなくなり、物理モデルの縮小化を目指したモジュール化などが行われている。以上をまとめると、従来の計算機は定性推論型の演算には最適であるとはいえない。本研究では自己修復型人工物に適した、新しい分散型情報処理チップを実現することを目指して研究を進めている。これは、定性推論のための演算に必要な十分な程度の、比較的low機能で回路サイズの小さい定性演算機を多数用意し、独立に動作させることができるようにするもので、物理モデルに応じて、それらの定性演算機間の結線を行い、ネットワークを組み上げる、高速かつ大量の情報処理を実現するものである。

本研究で作成を目指す情報処理回路は、自己修復型人

工物の活躍すべき極限環境下における動作を考慮し、情報処理回路それ自体の故障に対処することを考えた、以下のようなものである(Fig.1)。

まず回路の外延に並べられた比較回路が、外部から入力される定量的な情報を、「多い」「少ない」「正」「負」「ゼロ」等より単純で抽象度の高い定性的な情報に変換する。

回路の中央部には定性推論のための簡単な演算をするセルが数多く並べられている。各セルは、個々がそれぞれ決められた簡単な演算を行う専用回路である。挙動のモデルから導かれる値と、外部から入力される定性値の間に矛盾がないか推論を行う。

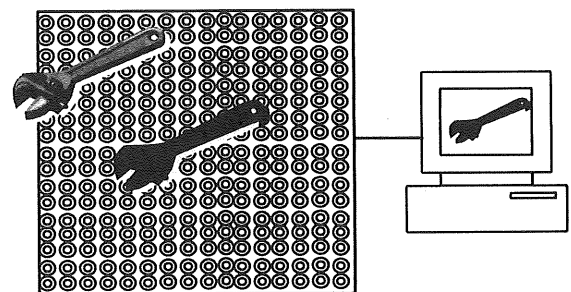
セル間でもネットワークが形成されており、セル同士で演算結果に矛盾が生じた場合には多数決が行われたり、互いの信頼度が変化する機能も実装される。

本回路の利点は、リアルタイムでの並列情報処理が可能である点である。また回路上のあるセルが故障したとしても、故障を含むユニット以外には影響が生じない。このようにモジュールを組み合わせることにより大規模な演算処理が可能になると考えられる。

## 3. 回路の試作

### 3.1 形状・移動検知センサへの適用

上記の回路を実現するため、まず光センサ（フォトトランジスタ）を一様に配置した形状・移動検知機能を持つセンサネットワークを設計し(Fig.1)、これに自己修復機能を持たせることを試みた。



◎ optical sensor

Fig.1 形状・移動検知センサ

各光センサに信頼度という概念を持たせることにより、定性的に光センサの故障を検知し、故障したセンサをネットワークから断線し、正常なセンサ同士で再配線することにより、センサネットワークとしての機能を

維持する。

### 3.2 自己修復アルゴリズム

光センサネットワークの性質上、隣接するセンサから得られる値は同じである確率が高いので隣接するセンサから得られる値を比較し、信頼性を決定する。具体的には以下のようになる。

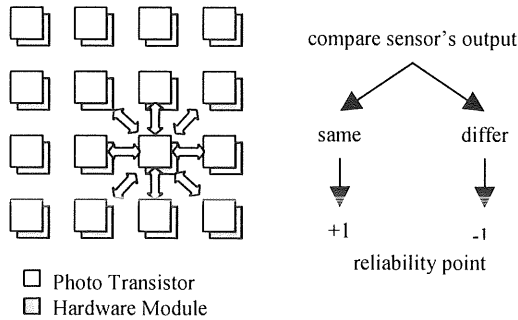


Fig.2 信頼度決定アルゴリズム

・ Fig.2 のように隣接するセンサとの値を比べ、値が同じであれば信頼度を1プラスし、値が違えば信頼度が1下がるようになっている。

・ 各センサは16bit(1-65536)の信頼度を表す点数を持っている。これにより正確な故障診断を阻害する例外事象のうち短期的に起こるものの影響を緩衝することができる。なおセンサの信頼度が0点になった時に故障と診断される。

・ 配線を変更する機能：故障と診断されたモジュールが出たとき、配線を Fig.3 のように変更する。すなわち、故障と判断されたモジュールに代わり、2 つ隣のセンサに対応するモジュールが比較対象となる。隣のセンサからの情報を遮断しても比較対象となるセンサを確保することで評価の客観性を保つ。次に述べる移動を検知する機能の保持にも効用がある。ただしあまり離れたセンサ同士が信頼性評価を互いにするのは適切ではないので、2 つ隣より遠いセンサとの比較は行わないようにした。

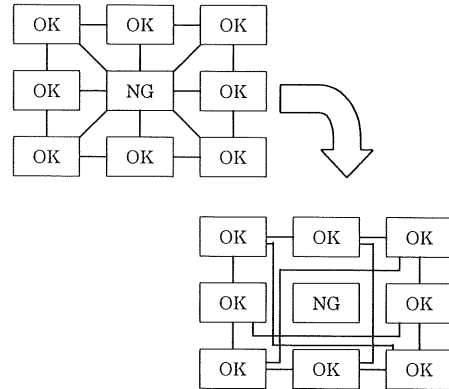


Fig.3 再配線機能

また自己修復機能の他に 16 個センサ群と演算部を合わせてモジュール化することにより、センサネットワークをスケラブルにした。移動検知・自己修復機能も分散処理で行うことによってセンサの数が巨大になろうとも演算速度を損なうことなく処理を行える。以上の機能を持ったプログラムを Verilog-HDL で記述し、FPGA に実装し、その動作を検証した。

全てのセンサに光を当てながら、一部のセンサへの光を遮断することで故障を模擬し、さらに十分な時間が経過した場合の影響を確かめた。Fig.4 の中の色が塗られたセンサは故障したセンサであり、中の数字はセンサの信頼度を 16bit で表したものである。

・ 正常なセンサが四方を故障したセンサで囲まれた場合は適切な挙動を示した(Fig.4-1)が、八方を囲まれた場合は中央の正常なセンサまで信頼度が下がり、故障と診断された(Fig.4-2)。

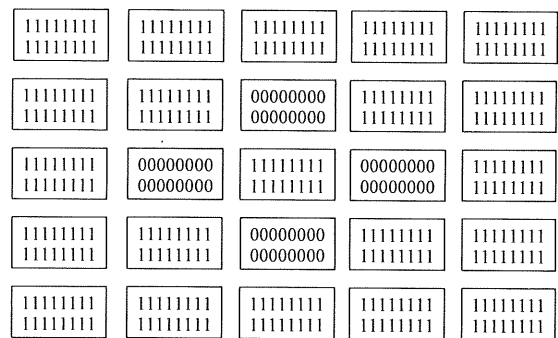


Fig.4-1 検証結果 1

11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111
11111111 11111111	00000000 00000000	00000000 00000000	00000000 00000000	11111111 11111111
11111111 11111111	00000000 00000000	00000000 00000000	00000000 00000000	11111111 11111111
11111111 11111111	00000000 00000000	00000000 00000000	00000000 00000000	11111111 11111111
11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111

Fig.4-2 検証結果 2

・まとまった範囲のセンサが故障した場合において、その範囲の広さによって結果が異なる。例えば1列まとめてセンサが故障した場合は、故障と診断されるが2列まとめて故障した場合は故障と診断されない

00000000 00000000	00000000 00000000	00000000 00000000	00000000 00000000	00000000 00000000
11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111
11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111
11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111
11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111	11111111 11111111

Fig.4-3 検証結果 3

またこの設計したプログラムが FPGA での動作が確認できたので、CMOS ASIC にするためのデザインファイルの設計を行った。ASIC にするため設計ファイル (Fig.5) の作成には以下のツールを用いた。論理合成には DesignCompiler、配置配線には Apollo、レイアウトデータの出力には Milkyway を利用した。

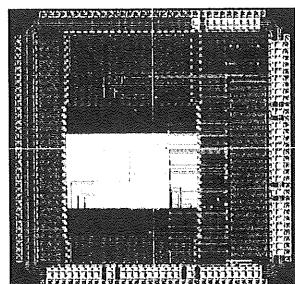


Fig.5 ASIC デザインファイル

## 4. 結言

- 1) 移動検知センサ群に自己修復機能をもたらす分割情報処理のためのプログラムを設計し、さらにハードウェアとして専用回路を製作し、その挙動を確認した。
- 2) 均質な構造を持つセンサ群に対して、専用回路による分散処理を行うことで、CPU を用いることでは不可能な高速処理を実現した。
- 3) センサの故障率が著しく高い場合を除いて、センサに信頼度という概念を持たせることはセンサネットワークに自己修復機能を実現させるにあたって有効である。
- 4) 本センサネットワークは光センサによる移動検知や、CT スキャナなど比較的均質なセンサを用いて動きのある対象に適用する際に有効に機能すると考えられる。

## 参考文献

- [1] 西田豊明:「定性推論の諸相」, 1993.
- [2] Y. Shimomura, S. Tanigawa, Y. Umeda, and T. Tomiyama, Development of Self-Maintenance Photocopiers. In AI Magazine, The American Association for Artificial Intelligence(AAAI), Vol.16, pp.41-53, No.4, 1995.
- [3] 坪井泰憲, 下村芳樹:「自己修復モジュールのための概念設計手法」, 2004.
- [4] K. Nagami, K. Oguri, T. Shiozawa, H. Ito, and R. Konishi, "Plastic Cell Architecture: Towards Reconfigurable Computing for General-Purpose," Proc. of 6th Annual IEEE Symposium on FPGAs for Custom Computing Machines (FCCM '98), pp.68-77, Apr. 1998