

人工物保全のための自己修復型センサネットワークの研究

Self-Maintenance 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 |
| 首都大学 | 下村 芳樹 | Yoshiki SHIMOMURA | Non-Member |
| 東京大学 | 石 伯軒 | Boxuan SHI | Non-Member |

Abstract In the 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 units with relatively low performance onto an application specific integrated circuit(ASIC). Now we are investigating the way mounting the self-maintenance logic by realizing the basic operating processor.

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。

センサネットワークの普及に伴い、より高機能・高信頼性を実現するものが求められつつある。多数のセンサを含むセンサネットワークをもつ人工物においては、各センサの故障は、ときに人工物自体の致命的な故障に発展する。原理的に故障を伴わない人工物は実現不可能なので、本研究では、センサの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を実現することを考える。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自己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。本研究ではセンサネットワークに自己修復機能を付加するための専用集積回路を開発することを目的とする。

2. 自己修復機能への要求

2.1 自己修復機能

近年の科学技術の著しい進歩にも関わらず生体では可能であっても人工物では実現不可能なことはまだまだ多数ある。両者においてその違いは「生産」と「保守」のしくみに端的に現れている。つまり、生体は増殖、形態形成、修復などのしくみを内蔵しているのに対し、人工物はこれらをすべて外部に依存している。つまり人工物に生体の細胞のように増殖機能を持たせることは難しいと言える。本来は人工物が自身の故障箇所を完全に修復する自己修復機能を持つことが望ましいが、人工物が増殖機能を持たない以上、そのようなシステムは現実的ではない。そこで本研究で提案するシステムでは故障発生によるシステム全体への影響を最小限にとどめ、全体としての機能を保持するものとする。Fig.1のように均質なユニットで構成された人工物（センサネットワーク）に対し、故障箇所を正常に動作しているユニットで補完することによって人工物の保全

連絡先:藤原 健、〒113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16
東京大学原子力国政専攻高橋研究室
電話: 03-5841-6974、fujiwara@sophie.q.t.u-tokyo.ac.jp

を実現できると考えた(Fig.1)。

2.2 定性推論

自己修復を実現するにあたって故障検知は最も重要な要素であるといえる。生体は故障検知のベースとなる情報を神経から得るが人工物はセンサから得ることになる。しかし閾値では故障を判断できない場合も多く、単に一つセンサの値だけでは故障を検知できないケースが多い。このようなケースではセンサの故障検知に定性推論を用いることが有効であると考えられる。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。すなわち、隣接するセンサが検知する値はオーバーラップしている確率が高いという考えのもと、センサ群の値を包括的に扱い、各センサが近傍のセンサと値を比較し、整合性を確かめ合うことによりセンサの故障を検知する。そして本研究ではネットワーク化された複数センサ間で情報を共有し、各センサの故障を判定する際の尺度となる“信頼度”を与えることによってセンサの故障を検知する(Fig.2)。

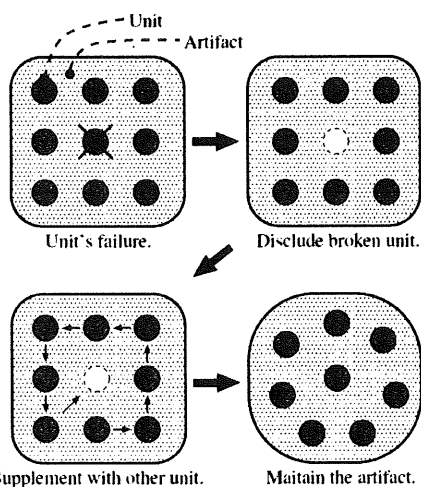


Fig.1 センサネットワークにおける補完

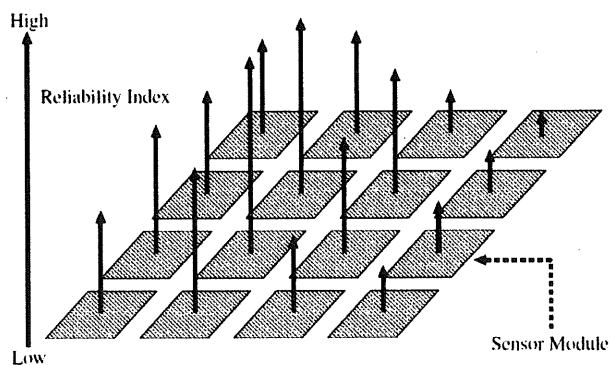


Fig.2 信頼度の概念図

2.3 専用回路による演算部の設計

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、演算精度の高さは求められない。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の能力でも十分である。しかし、高度な演算が求められないのとは逆に、人工物が複雑になればなるほど、人工物の規模が大きくなればなるほど、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、比較的低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。本システムの利点は、リアルタイムでの並列情報処理が可能である点である。複数の専用回路による分散処理であるため、一つ演算部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ロバスト性を持った大規模な演算処理が可能になると考えられる。

形状・移動検知センサネットワーク 本研究ではまず、光センサを多数配置した形状・移動検知センサネット

ワークを構築した。これは光に反応するフォトトランジスタで構成されていて、多数配置されたセンサ間で値を比較することによって、対象となる物体の影の形やその動きを検知する。本研究では、この光センサの故障を検知し、そのセンサからの情報を処理し、自己修復機能を実現するエージェントのネットワークを専用集積回路で実現する。この形状・移動検知センサは単純な構造で同質な光センサから構成されているので、故障検知のためのアルゴリズムの実装に適しているのに加え、個々のセンサの故障が全体の動作に大きく影響するため本研究の題材として選んだ。

3. 自己修復システムのシミュレーション

3.1 アルゴリズム

演算部を設計するにあたってまずコンピュータ上で自己修復アルゴリズムのシミュレーションを行い、信頼度がどのように変化するか調べた。

上記の形状・移動検知センサネットワークにおいて光センサと比較して形状・移動検知の対象となる物体が十分な大きさを持っている場合隣接するセンサは同じ値をとる可能性が高い。したがって一様に並べられたセンサ群において、各センサの信頼度は隣接する8近傍のセンサと値を比較することによって(Fig.3)各々のセンサの信頼度を決定する。

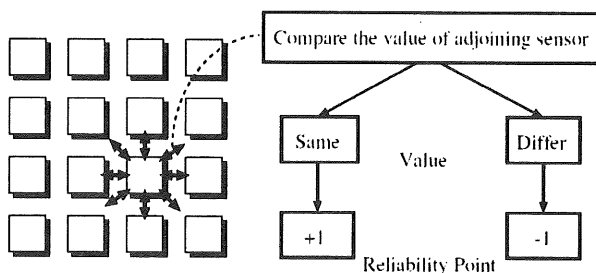


Fig.3 信頼度決定アルゴリズム

故障と判断されたセンサは形状・移動検知機能、故障診断機能に悪影響を及ぼす恐れがあるため、配線を変更する機能を加えた。故障と診断されたモジュールが出たとき、配線を Fig.4 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は情報を共有してはならず、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。

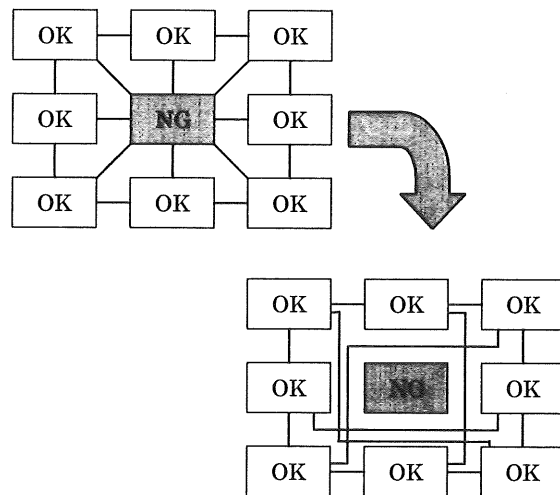


Fig.4 再配線機能

3.2 シミュレーション結果

信頼度を導入した自己修復アルゴリズムの有効性を確かめるためにコンピュータシミュレーションを行った。まず、このような機能を有する演算部を実装するためにプログラムをハードウェア記述言語(HDL: Hardware Description Language)により作成し、想定される故障をコンピュータ上でシミュレートし、信頼度の変化を調べた。シミュレーション環境は Quartus II、設計言語は Verilog-HDL である。近接するセンサはほぼ同じ強度の光に照らされるはずであるので、隣接するセンサから得られる値は同じである可能性が高い。そこで各センサは近接するセンサから得られる値と比較することにより信頼性を決定する。

図(Fig.5)に想定される故障の例の一つを示す。図の左部は16個のセンサで構成されるセンサネットワークの中の一つのセンサ(5番)が故障しており、20クロック後にさらに隣接するもう一つのセンサが故障した場合であることを示す。図の右部はそのときの信頼度の変化の様子を示す。故障したセンサノード(1番と9番)の信頼度が時間変化とともに下がっていき、反対に正常なセンサの信頼度は上がっている。

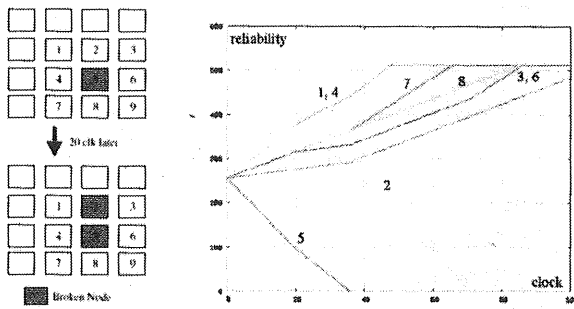


Fig.5 想定される故障発生事例と信頼度変化

4. デジタル ASIC の設計と動作検証

設計したプログラムの動作がコンピュータシミュレーションで確認できたので、実際に FPGA にプログラムをロードして実際にセンサを繋いでその動作を確認した。

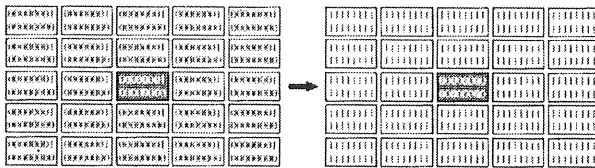


Fig.6-1 Case 1.

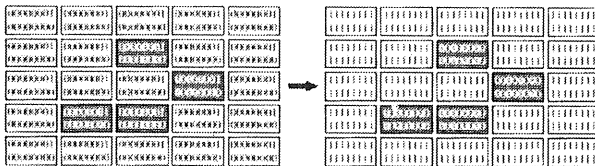


Fig.6-1 Case 2.

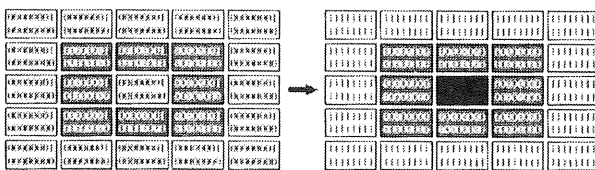


Fig.6-1 Case 3.

Fig.6 信頼度の時間変化

図(Fig.6)は3つの異なるケースにおいて時間が十分に経ったときの信頼度の変化の様子を示す。四角はセンサを示し、中の数字は信頼度を表す。黒く塗られた四角は故障を示し、赤く塗られた箇所は信頼度が不適切に変化してしまっていることを示す。Fig.6-1やFig.6-2のように故障したセンサが複数あってもセンサ同士が隣接してかたまっていない場合は故障したセンサの信頼度が適切に下がり、正確に故障診断されている事が分かった。つまりセンサの故障率が低い場合はセンサの故障を適切に検知しているがFig.6-3のようにセンサがま

とまって故障した場合は正常なセンサも故障と誤認されてしまった。それでも特定の配列に注目すると N 個のエージェントが同時に故障する確率は個々のエージェントの故障確率 P の N 乗になるのでこのような事象の生成する確率は P に比べて大幅に小さくなるといえる。

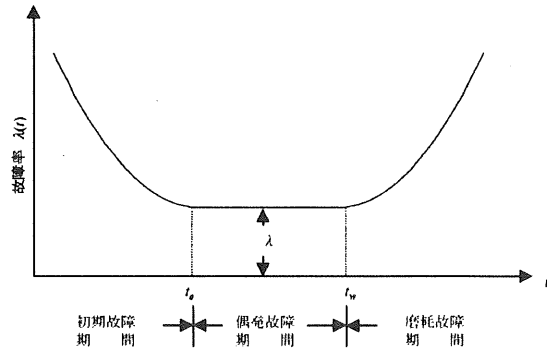


Fig.7 故障率のバスタブ曲線

代表的な電子機器・部品素子の故障率 $\lambda(t)$ は一般に時刻 t の関数として表わすことができる。この典型的な形を示すと、Fig.7 のようになる。この図から素子の一生ははじめ非常に故障の起こりやすい状態から段々と起こりにくい状態に移行する期間、故障率がほぼ一定となる期間および段々と故障が起こりやすくなる期間に大別することができる。このそれぞれの期間を

- 1) 初期故障期間 (early failure) ($0 < t < t_e$)
- 2) 偶発故障期間 (chance failure) ($t_e < t < t_w$)
- 3) 摩耗故障期間 (wear-out failure) ($t_w < t$)

と名付ける。このような故障特性を持つ人工物を組み合わせるセンサネットワークにおいて、センサの故障率が P の場合、センサネットワークの故障率は P の N 倍になる。移動・形状検知センサネットワークのようにセンサ一つの故障がシステム全体に影響するようなシステムにおいて、ネットワークがセンサの故障に対して耐性があることが望ましい。

初期故障期間と摩耗故障期間における故障はある程度予測が可能なので、初期故障期間においてはデバッグ、摩耗故障期間においては定期点検などといったメンテナンス工程で対処できる。しかし、偶発故障期間における故障の予測は難しい上、偶発故障期間におけるシステムの停止は好ましくないため、システムを稼

働させた後でのメンテナンスは非常に困難である。つまり人工物の効用を左右する要素として、人工物の偶発故障期間に対しての保全が非常に重要になってくる。この問題において、本システムのようにセンサの故障に対し、ロバスト性を持つシステムであればネットワークの信頼性を著しく上げる効果が期待できる。前項での結果から本システムは故障率が著しく高い初期故障期間に対しても耐性があり、最終的な摩耗故障期間においても寿命を伸ばすとともに、偶発故障期間におけるシステムの保全にも大きな効果があると考えられる。

FPGA での動作が確認できたので、同様の機能を持つモジュールを 49 個 (7×7 個) 含むプログラムをチップ化した、すなわち CMOS ASIC(ROHM 0.35 μm CMOS 4.9mm 角)にするためデザインファイルの製作を行った(Fig.5)。

以上により設計したデータを VDEC(大規模集積システム設計教育研究センター)の IC 試作サービスを用いて作成した ROHM0.35 μm CMOS プロセスで IC チップとし、製作された IC チップの動作検証を行い 100MHz のクロック信号を与えて動作を確認した。またこの ASIC は柔軟な拡張性を持っており、チップの大きさ変えたりチップを連結したりすることによってセンサの数がいくら多くなろうとも故障診断の処理を高速に行うことができる。

以上の検証結果から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。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。本センサネットワークは光センサによる移動検知や、放射線環境下のロボットのイメージセンサなど、極限環境下にある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。

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) アレイ状に構成された人工物の偶発故障期間において、信頼度を基づいた自己修復機能を持たせることはシステムの保全に有効である。
- 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
- [5] 主成分分析による構造システムの信頼性評価, 日本機械学会 第 11 回設計工学・システム部門講演会 講演論文集, pp.71-77, Nov. 2001