

ロボットシステム内電装系コンポーネントのための 自律分散型故障診断手法

○河野仁(東京大学) 田村雄介(東京大学) 山下淳(東京大学) 浅間一(東京大学)

1. 序論

災害対応や宇宙探査、海中探査などのために、人間作業の代替を目的とした極限環境用ロボットシステム(以下ロボットシステム)の開発が急務である[1, 2, 3]. しかし、極限環境はあらかじめその環境状態を想定することが難しく、ロボットシステムは想定外環境でも動作することが要求される。また、ロボットシステムがもし故障しても機能を維持し続ける、すなわち耐故障性の議論も重要であると著者らは考える。システムの耐故障性に関して、これまで多く議論されてきている。ロボットシステムにおいては、モデルベースによる故障検知手法や内外センサを用いた故障診断手法などがある[4, 5]. また、モデルベース手法はあらかじめロボットの運動モデルなどが必要であるが、機械学習によるモデルフリーな手法も提案されている[6]. これらの研究はあらかじめ耐故障性を考慮したロボットシステムを開発することが前提である。しかし、既に使用されているロボットシステムに耐故障性の機能が実装されているケースは多くなく、追加実装を前提とした耐故障性システムを議論することが必要である。そこで、本研究ではロボットシステムに故障検知や診断システムが実装されていないことを前提とし、追加実装が可能な故障診断手法を議論する。

耐故障性や故障診断手法の既存研究を俯瞰すると、中央集権的なシステム構成であったり、多くのセンサをロボットシステムに実装する必要がある。また、運動モデルを用いた手法は事前にモデルの把握が必要である。これらの手法は大きな成果を上げているが、故障診断用中央コンピュータ故障により故障診断システムがダウンする。また、センサ用ケーブルの配線とりまわしの問題、さらには複雑な運動モデルのリアルタイム計算などの課題がある。そこで、本研究では自律分散的で無線による通信、機械学習を用いたモデルフリーな故障診断システムの開発を目指す。これにより、既に運用されているロボットに対して大きな改良を加えずとも故障診断機能の追加実装が可能であると考え。本稿では基礎的検討として、電装系コンポーネントを故障検知対象とする。また、そのコンポーネントに実装する故障診断器をモデル化し、隠れコンポーネント故障診断問題を定義する。また、その解法として情報共有を用いた自律分散型故障診断手法を提案し、計算機実験から故障診断できることを評価したので報告する。

2. 故障と診断システム

本章では、はじめにロボットシステムの故障を定義し、ロボットシステムを対象とした故障診断の既存研究の課題を整理する。また、既存の自律分散型故障診断手法を概説する。

2.1 ロボットシステムの故障

Gray らは、コンピュータシステムやネットワークシステムの故障を“ある入力に対し、その系が予期しない出力をした状態”であるとしている[7]. ロボットシステムは、遠隔操作指令値や環境情報などの入力に対して、行動を出力する系であると言える。またロボットシステムの故障は、部品の破損や電子回路の故障など、内部コンポーネントの故障などである。そのため、本研究では Gray らの定義を用い、ロボットシステムの内部コンポーネントがある入力に対して予期しない出力を行った局所的故障状態を、ロボットシステムの故障として扱う。

2.2 ロボットシステムの故障診断

前章で俯瞰したロボットシステムの故障診断には、モデルベースによる故障診断、内外センサを用いた故障診断、学習による故障診断のように大きく分けて3つの手法が存在する。しかし、これらのアプローチはシステム構成が中央集権的であり、その計算機が停止すると故障診断ができない。また、計算コストや実装スペースの問題、運動モデルや環境モデルの取得などの課題が残っている。これらの問題に対し、本研究では以下に示すアプローチで故障診断システムの開発を目指す。

1. 自律分散的に故障診断
2. センサ類は無線通信により情報収集
3. 機械学習によるモデルフリー化

本稿では、1の自律分散型故障診断手法に関して議論を行う。

2.3 Adaptive DSD

コンピュータの故障診断では、既に自律分散型の故障診断手法が研究されている。自律分散型の故障診断手法として Adaptive Distributed System-level Diagnosis (Adaptive DSD) が提案されている[8]. これは、自律分散型のコンピュータネットワークにおけるコンピュータ自身の故障を診断する手法である。例えば、コンピュータが6台あったとし、図1の矢印のようにそれぞれのコンピュータ C_1 から C_6 が通信により接続する。また、このとき C_n は自己診断は行えず、あくまでも他のコンピュータの故障が診断可能である。もし、図1(a)のように C_4 が壊れた場合は、 C_3 が故障と診断し、次に C_4 が故障診断する C_5 の診断も行う。これにより順次故障診断が終了すれば、最終的にすべてのコンピュータの状態が明らかになるという手法である。コンピュータが2台故障した場合も同様に、図1(b)のように診断が可能である。したがって、最低2台故障していないコンピュータが存在していれば、そのシステム全体のコ

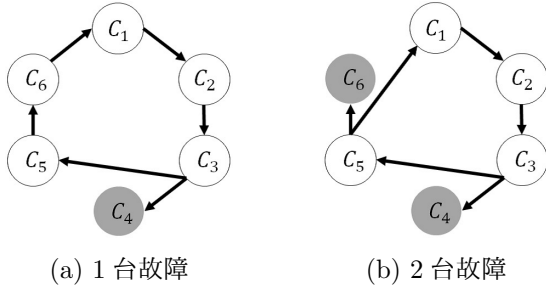


図 1 Adaptive DSD の例

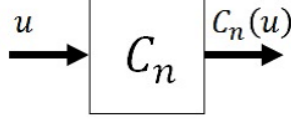


図 2 ロボットシステム内のコンポーネントのモデル

ンピュータの状態が把握可能となる。

3. 隠れコンポーネント故障診断問題

提案手法を述べるにあたり、前提条件としてロボットシステム内部のコンポーネントや、故障検知器のモデルを定義する。また、それらのモデルを考慮すると Adaptive-DSD では解決できない状態が存在することを、隠れコンポーネント故障診断問題として示す。

3.1 コンポーネントとその故障モデル

本研究で対象とする内部コンポーネントは、計算機やモータコントローラなどの電装系コンポーネントに限定して議論を進める。ロボットシステム内に実装されているコンポーネントは、指令値信号などの入力に対して、設計された信号を出力する系であり、図 2 のように定義する。これは、指令値 u に対してコンポーネント C_n が信号や値である $C_n(u)$ を出力する。また、基礎的検討のためコンポーネントは式 (1) の様に入力 $u = \{0, 1\}$ に対して同値を出力するモデルとする。

$$C_n(u) = \begin{cases} 1 & (u = 1) \\ 0 & (u = 0) \end{cases} \quad (1)$$

本研究において、コンポーネントは故障診断機能を有していないこととする。これは故障コンポーネントが自己の故障を診断した結果が信頼できないからである。また、コンポーネントは故障診断器と内部状態を共有するようなメカニズムを有していない。

3.2 故障診断器とその故障モデル

上述のコンポーネントを診断するために、本節ではコンポーネントの外部から故障を診断する故障診断器モデルを定義する。故障診断器は図 3 左のようにコンポーネントと接続する。本研究における故障診断器は、コンポーネントの入力と出力を監視することで故障検知を行う。これは、第 2.1 節に示した Grey らの故障状態を基本としている。故障診断器 D_n はコンポーネント C_n の入力 u と出力 $C_n(u)$ を運用前に学習し、入出力モデルを獲得していることを前提とする。運用時、故

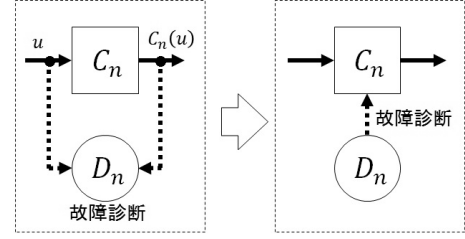


図 3 コンポーネントと故障診断器のモデル

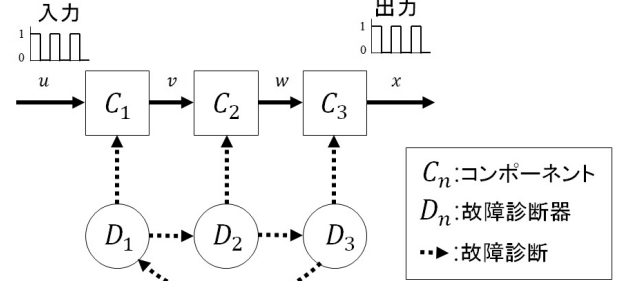


図 4 電装系モデル

障診断器は学習した入出力モデルを用いて入力 u から予期される出力 $C'_n(u)$ を算出し、実際のコンポーネントからの出力 $C_n(u)$ と比較する。そして次式のように故障検知を行う。

$$D_n(u, C_n(u)) = \begin{cases} \text{Fault-free} & (C'_n(u) = C_n(u)) \\ \text{Fault} & (C'_n(u) \neq C_n(u)) \end{cases} \quad (2)$$

本稿におけるコンポーネントの故障状態は完全故障とし、単純にどのような値が入力されても 0 を出力する状態とする。また、図 3 左の表記を簡略化し、図 3 右のように記述する。故障診断器はコンポーネントと同様に自己診断が行えないこととする。したがって、故障診断器自体の故障は他の故障診断器が検知を行う。故障診断器同士においては、コンポーネントとは異なり入出力信号などを直接観測することをせず、無線通信を用いたハートビートの観測などにより故障診断を行うことを想定する。

3.3 問題設定

ロボットシステムは通常 1 つのコンポーネントで構成されることは少なく、複数個のコンポーネントを組み合わせることで目的の動作を実現する。本稿ではコンポーネントモデルを直列に、故障診断器モデルはコンポーネントに対して並列に接続する。また、本研究では 1 つのコンポーネントに対して 1 つの故障診断器を装着するため、ロボットシステム内の電装系モデルを図 4 のように定義する。

自律分散的に故障診断が行える Adaptive DSD は、直接的な診断を用いる決定論的な手法である。これまでに定義したモデルを用いたロボットシステムへの応用を考えると、“ D_2 が故障しているとき C_2 の状態を診断出来ない” というような問題が発生する。

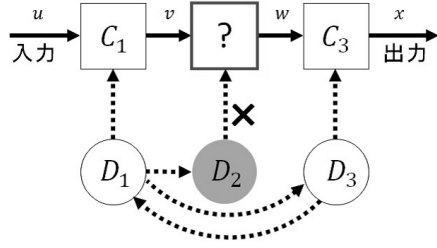


図5 コンポーネント C_2 の故障診断が行えない例

上記問題となり得る電装系モデルを図5に示す。また、この問題を“隠れコンポーネント故障診断問題”と呼ぶこととする。図5は故障の一例であるが、仮に D_2 が故障した場合、他の D_1 や D_3 から得られる情報を基に C_2 の状態を推定する必要がある。次章から D_2 が故障した場合の隠れコンポーネント故障診断問題を解決する手法を提案する。

4. 自律分散型故障診断手法

本稿では、前述の隠れコンポーネント故障診断問題に対して、Adaptive-DSDと診断情報の共有、尤度による故障診断法を提案する。本手法は、図5において D_2 が故障した場合、 C_2 が故障しているのかどうか明らかにすることが目的である。

4.1 故障推定法

本研究のコンポーネントのモデルでは、式(2)により一度故障を検知しただけでは故障状態が確定しない。故障したコンポーネントに入力される信号は0と1であるが、故障状態のコンポーネント出力は0のままであり、故障診断器は入力0に対して出力0の状態を故障と検知しない。

故障を検知するために、本研究ではコンポーネントの入力と出力の時系列データを観測し、故障状態の尤度（以下尤度）を用いて推定を行う。尤度は観測した時系列データ N と故障状態を検知した回数 n を用いて、 n/N により算出する。正常状態のコンポーネントにおける尤度は0である。常に故障状態が観測される場合は尤度が1となり、故障状態と正常状態の両方が観測される場合は、尤度が0と1の間を推移する。故障は、任意の閾値を用いる事で推定が可能となる。

4.2 情報共有による隠れコンポーネント故障診断

D_2 が故障した場合の隠れコンポーネントである C_2 の故障を診断するには、前述の尤度と正常な故障検知器間での情報共有で解決を行う。

D_3 は D_2 が所有している C_2 の入出力モデルを事前に共有する。次に、 C_2 の故障を推定する時、 D_3 が D_1 から C_1 の出力信号である v を受信する。これにより、本来 C_2 が出力すべき信号を予測可能である。さらに D_3 は C_2 の出力信号 $w (= C_2(v))$ を観測可能であるため、 D_1 から得た v を用いて C_2 の出力を予測し、実際に観測された w と比較することで C_2 の故障検知が可能である。前述の通り、一度の故障検知ではコンポーネントの故障が確定しないため、尤度による故障診断法を併用する。これまで述べた隠れコンポーネントの故障診断法を、式(2)のように次式で定義する。

$$D_3(v, w) = \begin{cases} \text{Fault-free} & (C'_2(v) = w) \\ \text{Fault} & (C'_2(v) \neq w) \end{cases} \quad (3)$$

上式は D_3 が C_2 の故障診断を行う場合である。 $C'_2(v)$ は、 D_2 が事前に獲得した C_2 の入出力モデルであり、 $C'_2(v)$ から C_2 が本来出力すべき値を予測できる。

5. 計算機実験

本実験では、基礎的な提案手法の効果確認のため3段の直列接続された簡単な電装系モデルを用いる。また、それらのコンポーネントにはそれぞれ1つずつ故障診断器が接続されている。各故障診断器は、他の故障診断器と診断結果を共有することができる。

5.1 実験条件

本実験では、図4の電装系モデルを用いて以下のような実験手順により計算機実験を行う。

1. 全コンポーネントと全故障診断器が故障していない状態を初期状態とする
2. 提案手法による故障診断を行い、各コンポーネントや故障診断器の診断を行う
3. D_2 を故障させる
4. その後 C_2 を故障させる
5. この時、提案手法を用いて D_2 と C_2 の尤度の変化を確認する

また、実験開始前から故障診断器はコンポーネントの入出力モデルを獲得しているものとする。コンポーネントへの入力信号は0.5秒周期で0と1の値をランダムに入力する。故障診断器は1秒に1回故障診断をおこなう。また各故障診断器は u, v, w, x とそれぞれの診断結果を共有できるとする。 D_2 の故障時間は実験開始から60秒後とし、120秒後に C_2 を故障させる。本実験で採用する故障状態は、どのような信号が入力されても何も出力しない完全故障である。故障の尤度を計算するためのデータ数 N は50とする。

5.2 実験結果と考察

D_3 の故障診断結果における、 C_2 の尤度と D_1 から受信した D_2 の尤度の時系列データを図6に示す。図6から、 D_1 は D_2 の故障を検知し約90秒の時点で故障尤度が1となっていることがわかる。故障尤度が1となったことから、 D_2 は故障していることが明らかである。また、 D_3 が推定した C_2 の尤度は、実験開始から120秒後に徐々に上昇を始め、尤度が0.6まで到達していることが見て取れる。 C_2 の入力ランダムに入力される1と0であり、故障していることからその出力は常に0である。そのため、故障状態が検出されるのは確率0.5である。 C_2 の尤度は0より高く、故障検出確率の値に推移しているため正常状態ではないことが見て取れる。

また、 D_2 の尤度が1となり故障が確定した段階では、 C_2 の尤度が0であるため、 C_2 が故障していないと判定することができる。さらに、実験開始から120秒後の C_2 を故障させた場合では尤度の上昇を図6から確認できる。これにより、 D_2 に隠れている C_2 の正常/故障を推定できることが確認できたとと言える。

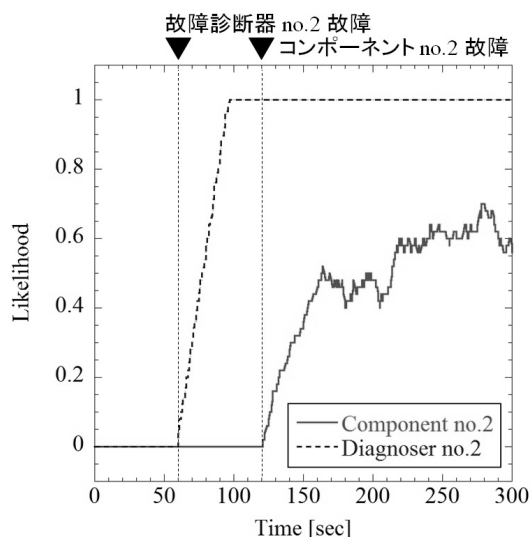


図6 D_2 と C_2 の尤度比較

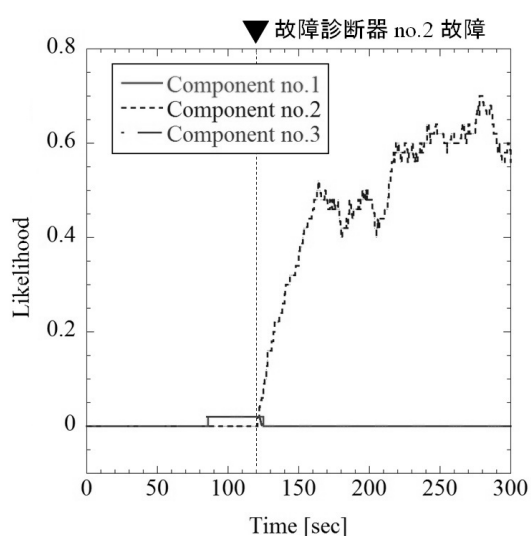


図7 各コンポーネントの尤度の推移

本実験における故障診断では、他の正常コンポーネントを故障と診断する場合があることが明らかとなった。 C_1 と C_3 の尤度の推移を図7に示す。図7から、約90秒の付近で正常コンポーネントの尤度が上昇し、その後0に戻っていることが見て取れる。これは、誤診であるが原因は正常コンポーネントの信号伝達遅延であると考えられる。しかし、尤度としては低い値であるため閾値を用いることで誤診の防止が可能である。

これらの結果から、 D_2 の故障と異なり C_2 の故障は尤度が1とならないが、適切な閾値を用いることで隠れコンポーネントの故障推定が可能であることが示唆された。

6. 結論

本稿では、複数のコンポーネントから構成されるロボットシステムを対象として、隠れコンポーネント故障診断問題を示した。その問題に対する解法として、情報共有と尤度を用いた自律分散型故障診断手法を概説した。また、計算機実験から隠れコンポーネントの故

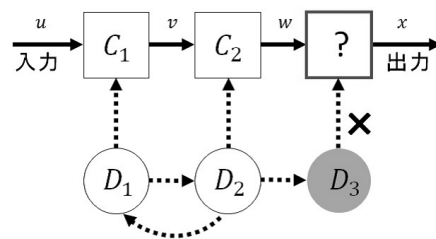


図8 隠れコンポーネントが正常コンポーネントの末端に位置する場合

障を診断できることを示した。

しかし、隠れコンポーネント故障診断問題として図8のように、末端のコンポーネントに対応する故障診断器が故障した場合、本稿で提案した手法だけでは故障診断が行えない。さらに、直列接続されるコンポーネントが多段同時に故障した場合なども故障診断できず、今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発促進プログラム (ImPACT) 「タフ・ロボティクス・チャレンジ」の援助を受けた。

参考文献

- [1] Y. Cui, J. Lane, R. Voyles and A. Krishnamoorthy: "A new fault tolerance method for field robotics through a self-adaptation architecture", 2014 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), pp.1–6, 2014.
- [2] A. Wander and R. Förstner: "Innovative fault detection, isolation and recovery on-board spacecraft: Study and implementation using cognitive automation", 2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), pp.336–341, 2013.
- [3] Q. Liu, D. Zhu and S. X. Yang: "Unmanned underwater vehicles fault identification and fault-tolerant control method based on FCA-CMAC neural networks, applied on an actuated vehicle", Journal of Intelligent & Robotic Systems, Springer Netherlands, vol.66, no.4, pp.463–475, 2012.
- [4] Z. Gao, C. Cecati and S. X. Ding: "A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.62, no.6, pp.3757–3767, 2015.
- [5] S. Okina, K. Kawabata, T. Fujii, Y. Kunii, H. Asama and I. Endo: "Self-diagnosis system of an autonomous mobile robot using sensory information", Journal of Robotics and Mechatronics, vol.12, no.2, pp.72–77, 2000.
- [6] I. Eski, S. Erkaya, S. Savas and S. Yildirim: "Fault detection on robot manipulators using artificial neural networks", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol.27, no.1, pp.115–123, 2011.
- [7] J. Gray, 渡辺栄一 (編訳): "フォールト・トレラント・システム", マグロウヒル出版, 1986.
- [8] 服部 聖彦, 高玉圭樹, 村田智, 古谷寛, 上野浩史, 稲場典康, 小田光茂: "自律分散型故障診断手法の提案 – on-line 分散型診断手法とその比較 –", 人工知能学会論文誌, vol.21, no.4, pp.417–427, 2006.