

ロボットシステム内電装系のための分散協調型故障診断システム

○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)

Distributed Cooperative Fault Diagnosis System for Internal Component of Robot System

○Hitoshi KONO (The University of Tokyo), Yusuke TAMURA (The University of Tokyo),
Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo), and Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract: Robot system has recently been studied in real-world situation such as space exploration, under water inspection and disaster response. In extreme environment, robot system has the probability of fault, therefore considering of fault tolerance is important for success of missions. In prior research, we proposed distributed cooperative fault diagnosis method for internal components of robot system. This method consists of some diagnosis devices called diagnoser, and diagnoser observes state of a electrical component. Some diagnoser executes the diagnosis in independent and parallel, and we assume that they are connected using wireless communication. In this paper, we propose the technique which is gathering the diagnosis results, and we confirmed that the diagnoser can detect the fault of component in three types of fault situations by conducting computer simulations.

1. 緒言

災害対応や宇宙探査, 海中探査など極限環境における人間の作業を代替する目的として, ロボットシステムが多く研究・開発されている。しかし, 極限環境で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そのような環境下でも動作し, ミッションを達成することが求められる。そのため, ロボットシステムにおける故障の検知や機能維持, すなわち耐故障性の議論が重要である[1]。

これまで, 様々なシステムにおいて耐故障性の検討がなされてきた。ロボットシステムにおいても例外でなく, モデルベース手法やシグナルベース手法, モデルフリーな手法などが検討されている[2, 3]。これらのアプローチは, 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となっている。しかし, 既に運用されているロボットシステムも多く, それらに対する既存手法の実装は搭載スペースやコンピューティングリソースなどの問題により容易でない。そのため既に開発・運用されている, 故障検知機能や診断機能を有しないロボットシステムに対して, 実装可能な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機能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。

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や, 多くのセンサを必要とするシステムが多い。また, モデルを用いた手法では, 事前に運

動モデルや環境モデルを設計し, ロボットへの実装やモデルのリアルタイム計算が必要である。そのため, 従来の研究では以下のような課題があると考えられる。

- システム構成が中央集権的
- モデルの事前設計が必要
- 故障診断システムの追加実装が困難

このような背景から, 著者らは非中央集権的でモデルフリー, 追加実装可能なシステム構成を前提とした, 分散配置された故障診断機が協調により故障診断する分散協調型故障診断システムを提案している[4]。著者らの手法は, ロボットシステムの電装系を故障診断対象としている。ロボットシステム内の各コンポーネントに故障診断機を配置し, それらが機械学習によりコンポーネントの正常な入出力を学習する。また, コンポーネントの出力が学習した結果と異なる場合, 故障診断機はコンポーネントが故障状態であると診断する。さらに, 各故障診断機は無線通信により診断情報を共有し, ロボットシステム全体の故障状態を把握する。

一般的に故障状態を定義することは難しく, 故障状態のモデルを用いる。例えば, システムに入力を与えても応答しない, すなわち出力が無い状態などである。著者らのこれまでの研究では, 上述のような 1 種の故障状態しか考慮していなかった。本稿では, 故障診断対象であるコンポーネントが, “出力が常に Low” や “出力が常に High”, “間欠故障” の 3 種の故障状態に対して故障診断が可能か, 計算機実験により検証したので報告する。

2. 故障と故障診断手法

2.1 ロボットシステムの故障

Grey は、コンピュータシステムなどの故障を“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[5]. ロボットシステムは通常さまざまなコンポーネントから構成され、系の集合体であるといえる. そこで、本研究では Grey らの定義を参考に、ロボットシステム内の内部コンポーネントが予期しない出力をした場合、すなわち局所的故障をロボットシステムの故障とする.

2.2 ロボットシステムの故障診断

ロボットシステムの故障診断には、モデルベースによる方法や、内外センサを用いた故障診断、学習による故障検出などが存在する. 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行えない場合がある. 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) 分散的で協調的な故障診断
- 2) センサと無線通信による診断結果収集
- 3) 機械学習によるモデルフリー化

本稿では、1)のアプローチに焦点を当て議論を行う. 次章から本研究の提案手法を述べる.

3. 分散協調型故障診断システム

本研究で提案している分散協調型故障診断システム (Distributed cooperative fault diagnosis system: DCFD) は、図 1 のようなコンポーネントと故障診断機の構成を想定している. コンポーネント C_n は、入出力を 1 つずつ持ち、入力 $u = \{0, 1\}$ に対し同値を出力するシンプルなモデルを考える. 各コンポーネント C_n は直列に接続され、信号伝達の依存関係がある. それらコンポーネントに対し、1つの故障診断機 D_n が接続される. 故障診断機は対応するコンポーネントの入出力を事前に学習し、共有させる. 運用時には、実際の入力に対して、学習結果から算出される出力と実際に観測した出力の値が異なる場合を故障と診断する. 故障診断機は診断結果を通信により情報共有し、最終的にすべての故障診断機がロボットシステム内の故障状態を保持する. また、故障診断機同士もハートビートなどを利用して相補的に故障診断が行えることとする[6]. これにより、ロボットシステム内の故障診断を実現する.

また、本手法の特徴は隠れコンポーネント故障診断問題を解決できる点にある. 隠れコンポーネント故障

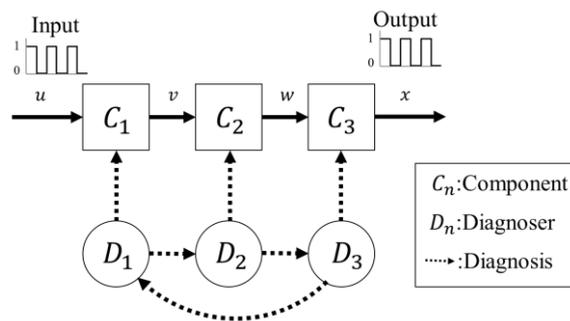


Fig. 1 Model of internal components and diagnosers

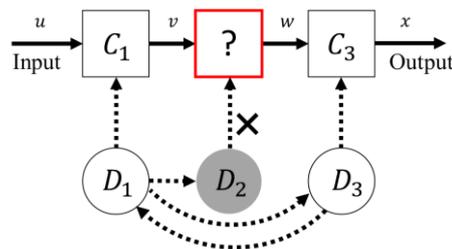


Fig. 2 Hidden component fault diagnosis problem

診断問題とは、著者らが定義した図 2 に示すような、多重故障状態の故障診断である. これは、 D_2 が故障したことにより C_2 の状態をどの故障診断機からも観測できない状態である. DCFD では D_2 が故障した場合、 D_1 が図 2 中の v を観測し、事前の通信によって共有された D_2 の学習結果から、 D_3 が C_2 の予期される出力 w' を算出する. さらに、 D_3 が図 2 中の w を実際に観測し、予期される出力 w' と比較することで C_2 の故障を推定する手法である.

4. 計算機実験

DCFD の基礎的な効果確認のため図 2 の電装系モデルを計算機シミュレーション内に構築し実験を行った.

4.1 実験条件

本実験では、以下のような実験条件により計算機実験を行った.

- 1) 全コンポーネントと全故障診断機が正常な状態を初期状態とする
- 2) DCFD による故障診断は常に実行し、コンポーネントや故障診断機の診断を行う
- 3) 任意の時点で D_2 を故障させ、故障診断が可能か確認する
- 4) この時、隠れコンポーネントである C_2 は正常状態であるため、 D_2 以外の故障診断機が C_2 の状態を推定できるか確認する
- 5) 次に C_2 も故障させ、隠れコンポーネント状態にあ

る C_2 も故障したことを、DCFD を用いて故障診断できるか確認する

本実験の前提として、実験開始前から故障診断機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。故障診断機は1秒に1回故障診断を行う。さらに、各故障診断機はコンポーネントが伝達する各信号の値 u, v, w, x と、それぞれの診断結果情報を共有できるものとする。 D_2 が故障する時刻は実験開始から60秒後とし、 C_2 が故障する時刻は120秒後とする。

本実験で採用するコンポーネントの故障状態は、以下に示す3種類とする。

- A) 任意の入力に対して出力が0
- B) 任意の入力に対して出力が1
- C) 間欠故障（故障時の状態はAと同様）

故障状態C)は、故障状態A)がランダムに発生することを意味し、コンポーネントが故障と正常の状態を繰り返す。これまで述べたコンポーネントのモデルや実験条件に対してDCFDの手順を用いる場合、故障診断機は1回の故障診断では診断結果を確定させられない。なぜならば、故障状態によってはコンポーネントの故障に関係なく、故障診断機は正常と診断する場合が確率1/2で存在するからである。例えば、上記の故障状態Aを採用した場合、コンポーネントに0が入力された場合、出力がとりうる値は0である。これは正常な状態のコンポーネントと同様な挙動であるため、故障診断機が算出するコンポーネントの予期される結果と一致してしまう。これによる誤診断を回避するために、DCFDではコンポーネントの入出力の時系列データを観測し、故障状態の尤度（以下、尤度）を用いて診断を行う。尤度は故障診断機が観測した時系列データ数 N と故障と診断した回数 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。常に故障が観測されるような場合は、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。これにより、故障は任意の閾値を用いることで推定が可能となる。時系列データ数 N は、多すぎると尤度が上昇するまでの時間が長くなり、少なすぎると尤度が不安定になる。そのため、本実験においては事前実験から $N=50$ とした。

4.2 実験結果と考察

実験開始から60秒後の故障診断機 D_2 が故障した時、 D_1 が故障検知器自体の故障を検知できることを確認した。また、コンポーネント C_2 が故障する120秒後まで、 C_2 は故障していないと診断可能であることを確認した。

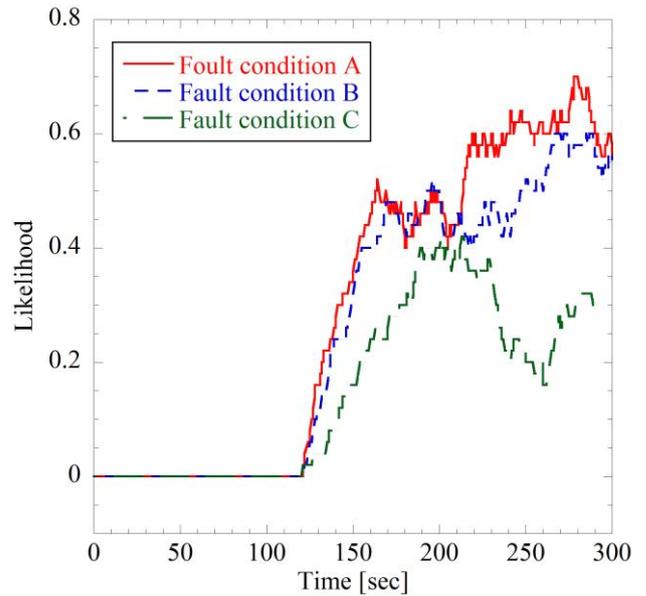


Fig.3 Comparing of likelihoods among three fault conditions

その後、 C_2 が故障した際は故障診断機 D_1 と D_3 が情報を共有し、 D_2 と C_2 の多重故障を診断することが可能であることを確認した。

各故障状態における故障診断機 D_3 が算出した C_2 の尤度を図3に示す。故障状態AとBにおいては、尤度が上昇し0.5付近を推移している。これは、観測した時系列データに対して故障と診断される場合が確率1/2だからである。また、故障状態Cの場合においては、他の故障状態と比較して尤度の上昇が緩やかである。また、推移する値も0.25付近であることも見て取れる。C)の故障状態は、A)が確率1/2で発生するため、故障と診断される確率は1/4となる。これらの結果から、複数種の故障状態においても、閾値を適切に設定することで隠れコンポーネント故障診断がDCFDにより実現可能であることが示唆された。

5. 結言

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、分散協調型故障診断システムDCFDを提案した。本稿では、シンプルなコンポーネントモデルや故障診断機モデルを採用し、計算機実験から有用性を確認した。また、コンポーネントモデルの故障状態には、常に0と常に1、ランダムな間欠故障の3種類を採用し、これらの故障状態でもDCFDにより故障診断が可能であることが示された。

しかし、他の故障診断機が故障した場合の隠れコンポーネントや、コンポーネント間の接続関係が異なる場合における提案手法の適用法など課題が残っている。さらに、今後は実機による有用性検証が必要である。

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] J. Carlson and R. R. Murphy, “How UGVs physically fail in the field”, IEEE Transaction on Robotcs, Vol. 21, No. 3, pp. 423-437, 2005.
- [2] 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.
- [3] Z. Gao, C. Cecati, and S. X. Ding, “A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques — Part II : Fault Diagnosis With Knowledge-Based and Hybrid / Active Approaches”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 6, pp. 3768-3774, 2015.
- [4] 河野仁, 田村雄介, 山下淳, 浅間一, “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”, 第 33 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2015AC3H2-04 (CD-ROM), 2015.
- [5] 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.
- [6] 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.