

令和元年8月30日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00314

研究課題名（和文）時系列データからの構成要素間因果関係抽出によるビル空調システム異常診断方法の確立

研究課題名（英文）Establishment of fault diagnosis method based on time series data based according to Causal relationship extraction among the components of Building Air-conditioning System

研究代表者

湯本 真樹（YUMOTO, Masaki）

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：00304064

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ビル空調システムにおいて測定値時系列データは多数のセンサから観測されているが異常検知は困難である。これは専門家知識により異常を検知するためである。そのためデータからの自動的な異常検知方法が求められている。本研究では、ビル空調システムにおける測定値時系列データからの構成要素間の因果関係を表す定性モデルによるラフ集合の決定ルールを用いた異常診断方法を提案した。提案方法ではまず、測定値時系列データを定性モデルにもとづいてデータセットに変換する。次に各区画のデータセット比較によりラフ集合の決定ルールを求め、最後にルールが持つ評価値から異常を特定する。実証実験では専門家知識を使わず異常を診断できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではビル空調システムにおける測定値時系列データから求めるラフ集合の決定ルールを用いた異常診断方法を確立した。提案方法により専門家知識を用いずに異常状態が発生した区画を検知できる。また異常発生が特定できた場合に、異常状態を示す決定ルールにより異常状態の原因を特定できる。本研究ではさらに、異常状態の特徴把握により異常検知に必要な専門家の判断基準を自動的に求める方法を確立した。異常状態でのデータの特徴をラフ集合の決定ルールにより表現して判断基準とする方法により、新しい空調システムに対して従来は専門家が手作業で行っていた判断基準作成を、提案方法では異常状態の特定だけで自動的に抽出できる。

研究成果の概要（英文）：In a building air-conditioning system, measured time-series data is observed from many kinds of sensors. It is difficult to detect the fault by the administrators because only the limited experts can diagnose the unusual system. Thus, a new method is required, which can detect faults from measured data using computers automatically. This research proposes the method of fault diagnosis with decision rules of rough set based on qualitative model of measured time-series data in building air-conditioning system. First, the proposal method converts target measured time-series data into data set based on target qualitative model. Next, this method constructs the decision rule of a rough set by comparison of the data set for every block. Finally, this method detects fault through comparison of evaluation values. Through practical experiments, it is confirmed that the proposal method can detect faults without expert knowledge in a building air-conditioning system.

研究分野：知能情報処理

キーワード：異常診断 意思決定支援 測定値時系列データ ビル空調システム 定性値 決定ルール 定性モデル データセット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) ストリームデータ処理と呼ばれる、対象システムから得られる時系列データ(ストリームデータ)から必要な情報を抽出するデータ処理方法が注目されている。ビル空調システムにおいて時系列データは各種センサから大量に得られるため、ストリームデータ処理により対象データのうち特に重要と思われるデータに着目して必要な情報を抽出できれば、その結果から異常発生時に確認される特徴的なデータを見つけ出す方法が確立できる。

(2) これまで「測定値時系列データからの情報抽出にもとづくビル空調システム異常状態検知」として周波数成分の振幅部において判別分析などにより継続的な上昇下降の変化を抽出する方法を提案している。また「ラフ集合の決定ルールを利用したレコメンデーションシステム」として代表的なサンプルを評価し、同じ評価を受けたサンプルの定性的な属性値およびその組み合わせを利用者の嗜好として抽出し、すべての代替案を評価して推薦する方法を提案している。

2. 研究の目的

本研究ではビル空調システムから得られる測定値時系列データに対して、その構成要素間の因果関係を抽出し、異常状態診断方法を提案する。具体的には、過去の研究成果にもとづいて時系列データからストリームデータ処理により得られる「特徴的な時系列データの変化」などに対して、サンプル評価から利用者の嗜好を抽出する要領で定性的な属性およびその組み合わせを抽出し、異常状態発生を検知する。この異常状態検知にあたり、対象とするビル空調システムの構成要素間の因果関係にもとづいて解析モデルを構築する。さらに得られた異常状態検知結果と過去に専門家が実際のシステムに対して判断した異常診断事例から異常発生原因の特定を試みる。

3. 研究の方法

(1) ストリームデータ処理の方法として、(a)複数の評価方法をもつデータの組み合わせから評価方法の重み付けに応じて最適なデータの組み合わせを求める方法、(b)定性的な表現を定量的に評価する方法を提案し、対象システムから得られる時系列データから必要な情報を抽出する複数の方法の比較・検証を行う。

(2) 収集したデータから代表的な性質を持つものを抽出してサンプルとして設定し、そのサンプルが把握したい特徴をもつかどうかを判定する方法にもとづいて、把握したい特徴をもつと判定したサンプルに含まれる属性値もしくは属性値の組み合わせを求める仕組みを構築する。

(3) 実際に稼働しているビル空調システムにおいて、(1)において検討した結果にもとづいて観測された測定値時系列データから必要な情報を抽出する。次にシステムの計装図から作成した定性モデルを利用して、(2)において検討した結果にもとづき異常状態の発生を特徴的な属性または属性値の組み合わせにより表現する方法を提案する。最後に、(2)において検討した結果にもとづき異常状態を属性値もしくは属性値の組み合わせにより表現する方法によって専門家の知識にもとづいて異常が発生した原因を特定する。

4. 研究成果

(1) データ組み合わせ(データセット)を利用した決定ルールによる異常状態検知情報の抽出

異常状態検知に関する情報を抽出するために、ビル空調システム構成要素間の因果関係をもつ測定値時系列データからラフ集合による決定ルールを抽出する方法が考えられる。

ラフ集合とは、対象の集合をうまく特定できる範囲で情報を粗く(ラフに)することで対象の集合のほどよい記述を求める手法であり、デザインや物品選択支援に適用されている。

ラフ集合は名義データと呼ばれる定性値で表現された集合に対して、条件属性の重要性を評価することが可能である。ラフ集合にはさまざまな種類が存在する。ここではビル空調システムの異常状態検知を行うためにデータマイニング手法として利用されている決定ルールを採用した。決定ルールはラフ集合から導出されるルールのうち、下近似から if-then 形式のルールとして抽出される確実性ルールである。表 1 に決定ルール作成のためのサンプルの判断例を示す。表 1 において、サンプル X_i ($i=1 \sim p$) は利用者によって“Good”と判断された集合、サンプル Y_j ($j=1 \sim q$) は“Bad”と判断された集合をあらわしている。各サンプルは属性 k ($k=1 \sim r$) ごとに評価されており、サンプル X_i における属性 k の評価は x_{ik} によって、サンプル Y_j における属性 k の評価は y_{jk} によってそれぞれ定性的な値により評価されているものとする。 x_{ik} で表現される属性値は y_{jk} と同一である場合もあれば異なる場合もある。もしサンプル X_i における属性 k の属性値 x_{ik} がサンプル

表 1. 属性値をもつサンプルデータの評価例

Sample No.	Attribute				Estimation
	1	2	...	r	
X_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1r}	Good
X_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2r}	Good
:	:	:	:	:	:
X_p	x_{p1}	x_{p2}	...	x_{pr}	Good
Y_1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1r}	Bad
Y_2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2r}	Bad
:	:	:	:	:	:
Y_q	y_{q1}	y_{q2}	...	y_{qr}	Bad

Y_j において該当する属性値 y_{jk} と異なっているのであれば、 x_{ik} は判断が “ Good ” となったサンプル X_i の独自性と考えることができる。これは複数の属性値の組み合わせでも同様である。そこでサンプル $Y_1 \sim Y_q$ に対するサンプル $X_1 \sim X_p$ の独自性は次式の論理演算で表現する。

- (サンプル Y_1 に対する X_i の独自性)
 $= (y_{i1} \text{ と異なる値の場合の } x_{i1}) + \dots + (y_{ir} \text{ と異なる値の場合の } x_{ir}) \dots \dots \dots (1)$
- (サンプル $Y_1 \sim Y_q$ に対する X_i の独自性)
 $= (\text{サンプル } Y_1 \text{ に対する } X_i \text{ の独自性}) (\dots) (\text{サンプル } Y_q \text{ に対する } X_i \text{ の独自性}) \dots \dots \dots (2)$
- (サンプル $Y_1 \sim Y_q$ に対する $X_1 \sim X_p$ の独自性)
 $= (\text{サンプル } Y_1 \sim Y_q \text{ に対する } X_1 \text{ の独自性}) + \dots + (\text{サンプル } Y_1 \sim Y_q \text{ に対する } X_p \text{ の独自性}) \dots \dots (3)$

上記の式のうち(1)(2)式から求まる(3)式によってラフ集合の決定ルール、すなわち “ Good ” に含まれて “ Bad ” に含まれない属性値の組み合わせが求まる。またラフ集合では決定ルールが “ Good ” と判断したサンプルの中に含まれる割合を決定ルールの的中率と考え、Covering Index (C.I.) 値として計算する。

ビル空調システムの異常状態検知に関する情報を(3)式に示す決定ルールにより抽出するためには、システムから観測される測定値時系列データから決定ルールを作成するためのデータを抽出する必要がある。ここでビル空調システムを表現した定性モデルを図1に示す。図1において四角はノードを表し対象の状態要素を表す。各ノードは定性値によって状態が表現される。この要素はビル空調システムにおける測定値時系列データを観測する各種センサに対応する。ひし形の図形は関数を表し各種センサに働きかける要素を表す。矢印によって示される入力ノードの定性値によって出力ノードの定性値が定まる場合、構成要素間の因果関係は関数を用いて表現される。

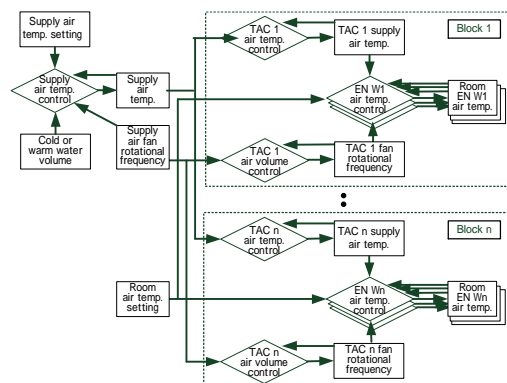


図1 ビル空調システムの定性モデル

図1の定性モデルが示すビル空調システムの構成要素間の因果関係によって、「ある単位時間における入力ノードの値によって次の単位時間の出力ノードの値を決定している」ことが表現される。そこで本研究ではビル空調システムの因果関係を表す関数によって表現される「ビル空調システムの制御などによって発生する時間 i での状態変化」を、決定ルールを作成するための情報として抽出する方法を確立した。求める状態変化は出力ノードの定性値変化と関係するノードの定性値の組み合わせ(データセット)として次のように表現されることとした。

$$\begin{aligned}
 & (\text{単位時間 } i \text{ における出力ノードの定性値の変化}) \cdot \\
 & (\text{単位時間 } i \text{ における入力ノード } 1 \text{ の定性値}) \cdot \dots \cdot \\
 & (\text{単位時間 } i \text{ における入力ノード } n \text{ の定性値}) \dots \dots \dots (4)
 \end{aligned}$$

(4)式に示すデータセットを求めるにあたり、測定値時系列データの長さに対する対応が求められる。ビル空調システムの各種センサから観測される測定値時系列データは数分おきに観測されるため、異常状態検知対象を行うためには1つのセンサから数百以上の測定値時系列データからデータセットを求める必要がある。ただし、全ての測定値時系列データから得られるデータセットを対象にすると、検知の対象としたいビル空調システムの本質的な動作を把握できずにシステムに発生している異常状態を検知できない可能性がある。また測定値時系列データには朝の空調システム稼働時などに予測される一時的な温度変化も含まれており、これらを異常状態検知の対象に含めることは適切ではない。

そこで本研究では長期間観測された測定値時系列データから確認したいビル空調システムの本質的な動作を把握するために、(a)一時的な温度変化にとらわれずに大まかな動作を把握でき、かつ(b)長期間の測定値時系列データを利用した場合でも高速に異常状態を検知できるようにするため、データセットの情報を圧縮して利用する仕組みを確立した。すなわち一定回数以上発生したデータセットのみを「対象とする区画の本質的な動作を表すデータセット」として決定ルール作成に利用する仕組みを確立した。具体的には、測定値時系列データからのデータ組み合わせ(データセット)抽出方法として以下の手順を提案した。

- (Step. 1) ビル空調システムから観測された測定値時系列データと定性値定義から、定性値で表現される時系列データを求める。
- (Step. 2) ビル空調システムの計装図から得られた定性モデルが示す構成要素間の因果関係により、(Step. 1)で求めた時系列データからデータセットを作成する。
- (Step. 3) (Step. 2)で得られたデータセットについて内容ごとに数をカウントする。そして一定回数以上の内容をもつデータセットのみを、決定ルールを作成するためのデータセットとして用意する。

本研究では上記の手順により実際に稼働しているビル空調システムから得られた数日間の測定値時系列データから上記の手順によりデータセットをもとめ、その結果から次の(2)で説明する異常状態検知・診断に必要なラフ集合の決定ルールが求まることを確認している。

(2) ビル空調システムに対する異常状態検知方法・診断方法の確立

対象とするビル空調システムの構成要素間の因果関係は図1に示す定性モデルで表現できる。したがって定性モデルと記号化された測定値時系列データから(1)に示す方法により異常状態検知に必要なデータセットを、個別に給気制御が行われている区画ごとに抽出できる。したがって計装図により定性モデルを構築できるビル空調システムにおいて実際に観測された正常状態の測定値時系列データの中に異常状態検知の対象となる測定値時系列データが存在するのであれば、複数の区画ごとに求めたデータセットの比較を行う方法により異常状態の検知が可能となる。

本研究では(1)において紹介した手順にしたがって定性値で表現された時系列データから得られたデータセットの中で一定回数以上の頻度で発生したものを対象に、同様の制御が行われる複数の区画から得られるデータセットの比較により異常状態検知の情報を抽出する方法を確立した。提案方法ではまず正常状態と異常状態検知の対象となる測定値時系列データについて、予め設定した定性値定義にもとづいて定性値による時系列データに変換する。次に対象とするビル空調システムの計装図から求めた定性モデルにもとづいて、正常状態と異常状態検知対象それぞれについての時系列データのデータセットを求める。最後に求めたデータセットについて正常状態と異常状態検知対象となる状態をそれぞれ“Good”と“Bad”と設定してラフ集合の決定ルールを作成する。このように区画別に求めた決定ルールがもつC.I.値の比較を3種類以上の区画で同様の制御が行われる場合に適用する方法により、異常状態が発生した区画を検知することができる。この検知はビル空調システムにおいて複数の装置で異常の同時発生は想定しなくてよいという専門家の判断にもとづいている。

さらに異常状態検知結果にもとづいて検知個所に異常が発生した原因を把握する異常診断を行う方法を確立した。具体的には異常状態の発生が特定できた場合について、異常状態を示すデータセットを“Good”、正常状態を示すデータセットを“Bad”と判断した場合に得られる決定ルールにより異常状態の原因を特定する。

本研究において提案するビル空調設備異常状態検知方法ならびに異常診断方法を図2に示す。図2では次の手順で処理が行われる。

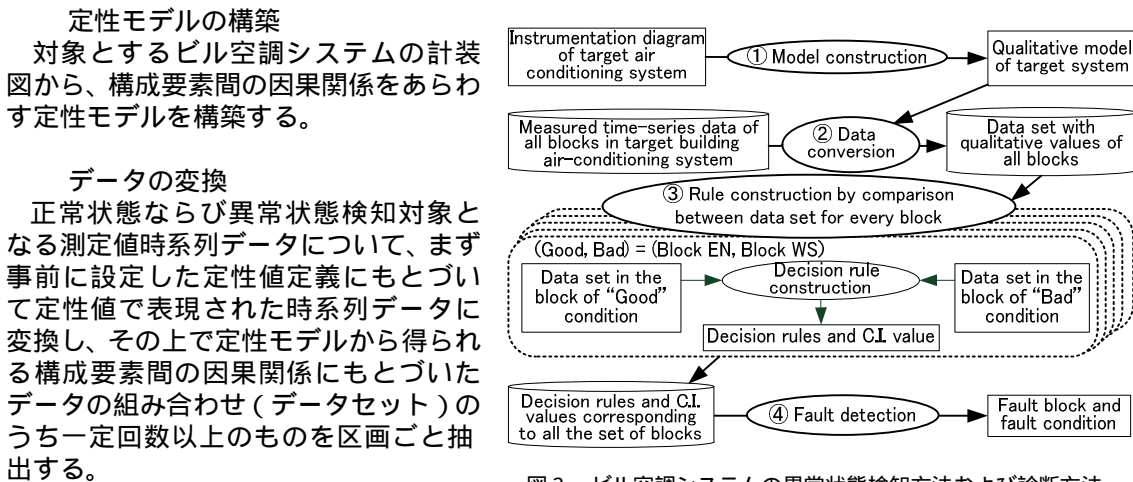


図2 ビル空調システムの異常状態検知方法および診断方法

データセット間の比較による決定ルール抽出

で求めた区画ごとのデータセットから2組を取り出し、“Good”と“Bad”を設定してラフ集合の決定ルールを求める。決定ルールは“Good”と“Bad”の設定を入れ替えた場合も求める。このような決定ルールの抽出はすべての区画のデータセット間で行う。その際、抽出したデータセット間の比較ごとに、得られた決定ルールがもつC.I.値の合計を算出する。

異常状態検知

で得られたデータセット間の比較ごとに得られたC.I.値の合計について、“Bad”と設定した区画ごとに値の合計を求める。最も合計した値が大きい区画に異常が発生していると判断する。さらに異常が発生した区画のデータセットを“Good”、正常状態と判断した合計した値が最も小さい区画のデータセットを“Bad”とした場合の決定ルールをの結果から求め、その決定ルールの内容から異常状態が発生したと判断した根拠を確認する。

(3) 異常状態検知のためのクライテリア抽出方法の確立

本研究ではビル空調システムの異常状態検知に必要な専門家の判断基準（クライテリア）をラフ集合の決定ルールを利用する方法により測定値時系列から自動的に求める方法を確立した。ビル空調システムにおいて異常状態で観測される測定値時系列データは正常状態のデータと比べて変化に違いが表れる。したがって正常状態と異常状態それぞれの測定値時系列データを定性値で表現した上で、正常状態に対する異常状態のデータの特徴をラフ集合の決定ルールにより表現する。具体的には正常状態での測定値に対応する定性値には“Good”、異常状態での測定値に対応する定性値には“Bad”と判断する方法より、ラフ集合の決定ルールによって異常状態の判断基準（クライテリア）を抽出する。すなわち、正常状態と異常状態それぞれの測定値時系列データを定性値で表現した上で、正常状態に対する異常状態のデータの特徴をラフ集合の決定ルールにより表現する。決定ルールは論理和標準形に出現する各論理積項として表現されるため、クライテリアとして利用することができる。

図3にビル空調システム異常検知クライテリア作成方法を示す。図3に示す作成方法は以下の手順で行われる。

正常状態ならびに異常状態の測定値時系列データを定性値定義にもとづいて定性値表現に変換する。

対象とするビル空調システムの計装図から構成要素間の因果関係をあらわす定性モデルを構築する。

の定性モデルから求めた定性値化された時系列データの集合をもとめデータ間の因果関係とする。

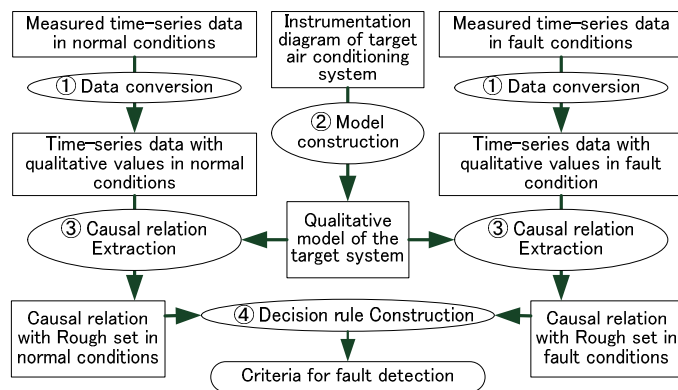


図3 ビル空調システム異常状態検知クライテリア作成方法

正常状態に対して求めた因果関係を“Good”、異常状態に対して求めた因果関係を“Bad”と判断する。その上で“Good”に対する“Bad”のラフ集合の決定ルールを求め、その結果を異常検知のクライテリアとする。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

湯本真樹、定性モデルにもとづくラフ集合の決定ルールを利用したビル空調設備異常検知方法、電気学会C部門論文誌、査読有、第138巻12号、2018、pp. 1613-1624

DOI: 10.1541/ieejieiss.138.1613

湯本真樹、正規化配分法とHough変換をAHPの代替案評価に利用した商品推薦システムの開発、電気学会C部門論文誌、査読有、第138巻7号、2018、pp. 886-898

DOI: 10.1541/ieejieiss.138.886

湯本真樹、利用者による3段階評価にもとづくラフ集合による学生向け賃貸物件推薦システムの開発、電気学会C部門論文誌、査読有、第138巻4号、2018、pp. 441-451

DOI: 10.1541/ieejieiss.138.441

湯本真樹、2種類の利用者の嗜好を利用したラフ集合による学生向け賃貸物件推薦システムの開発、電気学会C部門論文誌、査読有、第136巻7号、2016、pp.977-985

DOI: 10.1541/ieejieiss.136.977

〔学会発表〕(計7件)

湯本真樹、利用者の適性を考慮したラフ集合の決定ルールを用いた学生向け企業推薦システムの開発、平成30年電気関係学会関西連合大会、G11-18、2018、pp. 352-353 (in CD-ROM)

湯本真樹、定性的評価にラフ集合の決定ルールを用いたAHPによる商品選択支援システムの開発、平成30年電気学会電子・情報・システム部門大会、GS6-2、2018、pp. 1250-1255 (in CD-ROM)

湯本真樹、ラフ集合を利用したビル空調システム異常検知のためのクライテリア作成方法、平成30年電気学会全国大会、3-098、2018、pp.157-158

湯本真樹、代替案評価に正規化配分法とHough変換を利用したAHPによる意思決定支援方法、平成29年電気学会電子・情報・システム部門大会、GS2-6、2017、pp.1253-1258 (in CD-ROM)
湯本真樹、遺伝的アルゴリズムを用いた販売促進業務における商品棚配置提案作成方法、平成29年電気学会全国大会、3-039、2017、p.56 (第3分冊)
湯本真樹、利用者による3段階評価を利用したラフ集合による学生向け賃貸物件推薦システムの開発、平成28年電気関係学会関西連合大会、G11-21、2016、pp.367-368 (in CD-ROM)
湯本真樹、測定値時系列データの因果関係を利用したラフ集合によるビル空調設備異常状態検知、平成28年電気学会電子・情報・システム部門大会、GS2-2、2016、pp.1022-1027 (in CD-ROM)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。