

センサデータの次元削減による建築設備の エネルギー消費状態可視化

Sensor data visualization for building energy management systems by dimensionality reduction

吉田 圭吾*1
Keigo Yoshida

矢入 健久*2
Takehisa Yairi

町田 和雄*2
Kazuo Machida

戸河里 敏*3
Satoshi Machida

塩谷 正樹*3
Masaki Shioya

三浦 克弘*3
Katsuhiro Miura

枘川 依士夫*4
Yoshio Masukawa

*1 東京大学大学院工学系研究科
School of Engineering, Univ. of Tokyo

*2 東京大学先端科学技術研究センター
RCAST, Univ. of Tokyo

*3 鹿島建設株式会社 技術研究所
Kajima Technical Research Institute

*4 鹿島建設株式会社 建築設計本部
Architectural Design Division, Kajima Corporation

In this study, we propose a data handling method that visualizes operation status of latent systems behind observed sensor data by reducing their dimensionalities, preserving similarity of relationships between multivariate time-series data. For this purpose, we built a low-dimensional state map in which system status can be easily acknowledged by comparing correlation matrices for a certain period of time. We applied this method to real data from building energy management systems (BEMS) and verified the novel approach for energy waste detection.

1. はじめに

近年、オフィス環境の快適性と省エネルギーへの配慮から、施設内の環境及びエネルギー使用状況に関する情報を収集して監視を行い、室内環境に応じたエネルギー設備の総合的な運転管理を行う BEMS (Building Energy Management System) の導入が進んでいる。

しかし、運用者は BEMS から収集されるセンサ情報を見てシステムの状態を判断できるようになっているが、それらは数百系列の時系列データにより構成されており、さらにセンサの種類によって積算値や瞬時値など形態の異なるデータが取得されるため、運用者が全体を把握することが非常に困難である。従って、従来の BEMS ではデータ収集機能が中心であり、設備管理に関しては、非効率なエネルギー消費状態の顕在化にエキスパートの高度な知見と膨大なデータ処理が必要とされる現状にある。また、通常システムの長期にわたる運用は設計者と異なる運用者に業務委託されることが多いが、その際に設計意図や各機器の詳細な情報を運用者が完全に共有することは困難であり、設計仕様と運用状況にずれが生じることがある。このような運転実態により発生する、エネルギー消費上の削減余地を持つ不適切な制御状態 (本研究ではこの状態をエネルギーフォルト (EF) と定義する) には、顕在化されづらいという特徴がある。そもそも施設ごとに導入設備が異なり、大規模なシステムではその数も膨大なため、想定される EF 兆候に関する因果関係を網羅的にルールという形で記述すること、あるいは設計変更が行われた際にルールの一貫性を保つことが難しい。

これらの背景を受けて、膨大な情報量を目の前にしても、専門的な事前知識を持たずにシステムの状態把握を可能とする運用者支援システムの確立が重要であると著者らは考える。そこで本稿では、BEMS で得られる高次元の時系列データを要

約して、運用者が直感的にエネルギー消費状態を把握できるように支援する方法を提案する。提案に際して、“機構が変化すれば観測されるデータ間の関係も変化する”、“高次元の観測データに対して、システムの本質的な挙動はより低次元の多様体上に拘束されている”という仮説を立てた。そこで、時系列データに対して値自体に注目するのではなく、系列間の相関関係に焦点を当てそれらと比較し、相関関係の非類似度を次元削減により低次元の特徴空間に射影することで、データの挙動から導き出されるシステムのマクロな状態変化の表現を試みた。先駆的な研究にはセンサ間の非類似度を低次元で表現した Ide らの研究 [Ide 05] があるが、本稿では非類似度を時間軸方向で比較している。

なお、この手の問題は建築設備管理に限ったことではないことに言及しておきたい。近年のセンシング技術と情報管理システムの目覚ましい発展により、超高次元の時系列センサデータを用いて大規模で複雑なシステムの監視を行うことが、幅広い分野で慣例化してきた。とりわけ、日本政府の u-Japan 政策において「実物系ネットワークの確立」が重点課題として挙げられているように、センサーネットワークを利用した監視システムが、今後分野を問わずますます構築されていくと予想される。

2. 提案手法の概要

本章では、本稿で提案する手法について概説を行う。提案手法は、主に次の 3 つの過程から構成される (図 1)。

1. 各時系列データ間の系列間関係度の計算
2. 系列間相関度の非類似度の定量化
3. 非類似度に基づいた低次元空間での可視化

1. で求められる関係性を表す指標は、観測データの超高次元空間上に分布する。そのため 2. で集合の特徴を保ったまま非類似度という尺度に変換し、3. で状態の離れ具合を低次元の特徴空間で表現し、高次元観測データの次元削減を行う。

連絡先: 吉田圭吾, 東京大学大学院工学系研究科, 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学先端科学技術研究センター 14 号館, yoshida@space.rcast.u-tokyo.ac.jp

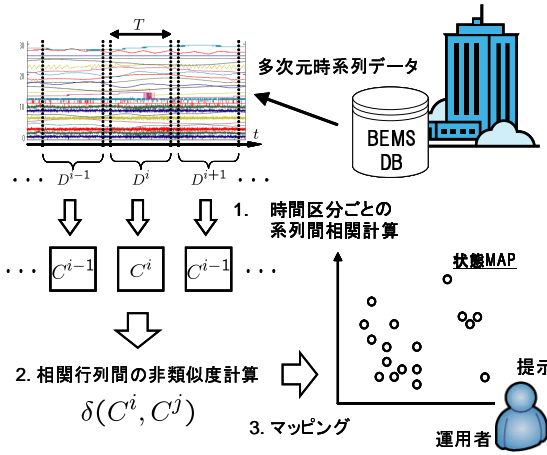


図 1: 提案手法の概略

2.1 各時系列データ間の系列間関係度

本稿では、系列間の関係性の指標として、系列間のピアソン相関係数を用いる。まず、全データを時間方向に長さ T の窓で N 個のデータセットに区分する。その後、各期間内で時系列間の相関行列を作成する。その際に期間内の分散が 0 のために相関係数が計算できない系列に関しては、微小なノイズを加えることで無相関状態を保存したまま相関行列に含める。

2.2 系列間関係性の非類似度の定量化法

続いて、状態地図の作成に必要な系列間の関係性の非類似度を定量化する方法を述べる。

まず、分割された各データ集合 D^i を用いて計算された、系列間の相関行列 $C^i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ に対して主成分分析を適用して、上位 $m (< n)$ 個の主成分に対応する主成分ベクトルを基底に持つ、相関行列の部分空間 $S^i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ を生成する。すなわち、

$$S^i = \text{span}(s_1^i, \dots, s_m^i) \text{ such that } C^i s_k^i = \lambda_k s_k^i \quad (1)$$

ただし、 $\lambda_1 > \dots > \lambda_k > \dots > \lambda_m$ を満たす ($k = 1, \dots, m$)。また、 s_k^i は正規直交ベクトルである。

部分空間同士の距離尺度として、画像パターン認識の分野で特に利用されている正準角を利用する。実行列 $A \in \mathbb{R}^{m \times p}$, $B \in \mathbb{R}^{m \times q}$ (A, B はフル列ランクを持ち、かつ $p \geq q \geq 1$) に対して、 A, B の列ベクトルが生成する部分空間 F, G の間の正準角は次のように定義される。

定義 1 部分空間 F, G のなす正準角 $\theta_k \in [0, \pi/2]$ ($k = 1, \dots, q$) は再帰的に次式のように定義される [Björck 73]。

$$\cos \theta_k = \max_{u \in F, v \in G} u^T v \quad (2)$$

ただし、 $u^T u = v^T v = 1$ かつ $u^T u_i = 0, v^T v_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, k-1$) を満たす。部分空間のなす正準角の余弦 $\cos \theta_k$ は、部分空間 F, G の正規直交基底ベクトルを列ベクトルとして持つ行列 U, V に関して $U^T V$ の特異値と一致することが知られている [Chatelin 93]。本稿では、行列 A, B の部分空間がなす正準角の組を

$$A \triangleleft B \triangleq (\theta_1, \dots, \theta_q) \quad (3)$$

と表すことにする。この正準角を用いることで、部分空間の構造的な距離を次のように定義することができる。

定義 2 部分空間 F, G の構造的な距離は次式のように定義される。

$$d(F, G) \triangleq 1 - \sum_{i=1}^q \frac{\cos^2 \theta_i}{q} \quad (4)$$

この定義には、部分空間の類似度を計量化している Fukui らの研究 [Fukui 03] を参考にした。以上をまとめ、2 つのデータ期間における相関行列の非類似度を次のように定義する。

定義 3 データセット D^i, D^j の非類似度 d_{ij} を

$$\delta_{ij} \triangleq d(S^i, S^j) \quad (5)$$

と定義する。

2.3 非類似度に基づいた低次元空間での可視化

前節で求めた相関関係の非類似度を入力として、低次元空間での可視化を行う手法について述べる。本稿では、多次元尺度構成法 (MDS) [Torgerson 52] と、MDS を非線形に拡張した ISOMAP [Tenenbaum 00] の 2 つの方法を利用して可視化を行った。両手法とも表現空間の次元数がパラメータとして与えることができるが、通常は 2 次元が選択されることが多い。

MDS MDS は対象間の非類似性の程度を示す測度が与えられたとき、対象を多次元空間上の点をして表現し、非類似性が点間の距離と最もよく一致するように点の座標を復元する手法である。いわゆる古典的 MDS では距離空間にユークリッド空間が仮定されることが多いが、本稿では前節の非類似度を要素にもつ距離行列 $\Delta = (\delta_{ij}) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ を入力値として、内積行列 B を次式により計算した。

$$B = -\frac{1}{2} H \Delta H^T \quad (6)$$

$H \in \mathbb{R}^{N \times N}$ は中心化行列と呼ばれ、

$$H = I_{N \times N} - \frac{1}{N} \mathbf{1}_N \mathbf{1}_N^T \quad (7)$$

と計算される。 $\mathbf{1}_N \in \mathbb{R}^N$ は全要素 1 の N 次元ベクトルである。 B の固有値分解により座標が復元される。

ISOMAP ISOMAP はデータの局所的な分布構造を考慮するように MDS を拡張することで、非線形多様体上に分布するデータを低次元空間に写像する非線形次元削減である。大まかな手順は次のように従う。(1) 全データ点の k 近傍グラフを作成し、(2) 2 点間のグラフ上最短距離を測地的距離とし、(3) 測地的距離の距離行列を MDS に入力して座標を求める。

3. BEMS データへの適用と考察

本章では、提案手法を BEMS から取得された実データに適用することで、建築設備におけるエネルギー消費構造の可視化を試みる。

本研究で用いた BEMS のデータは全 18 の時系列から構成され、同一空間における空調システムに関する 16 系列と 2 系列の外部環境要因からなる。より詳細には、空調システムは給気 (SA) に関する 6 系列、冷温水弁 (VLV) に関する 4 系列、インバータ (INV) 周波数を表す 2 系列、及び冷温水コイル (COIL) 熱量を表す 4 系列からなり、全て実数の観測時系列である。外部環境要因は外部気温及び外部湿度の連続値を取る時系列から構成される。サンプリングレートは全期間を通じて各系列とも 1/600 [Hz] である。データの分割期間として、システムが通常

稼動している午前 8 時 10 分から午後 8 時までの 12 時間分のデータを 1 日分と定義した。すなわち、1 日分のデータセットには、18 系列のデータが 72 点含まれていることになる。ただし、欠損を含む場合は欠損期間分を除外している。本研究ではこのデータセットを 244 日分用意して、提案手法を適用した。全期間の相関行列の固有値を計算した結果、上位 4 つの固有値の累積寄与率が 84.2%であったことから、部分空間の次元数は $q = 4$ とした。なお、各系列における観測値の値域が大きく異なるため、事前のデータ処理として各系列を平均値が 0、分散が 1 となるように標準化を施してから期間ごとの分割を行っている。

データが取得された期間中では、過剰な冷却除湿による非効率なエネルギー消費が発生していることが確認されている。これは、冷却除湿による過度な室温低下を回避するために再熱を行う制御において、過大な低湿度設定などが原因となり冷熱供給量と温熱供給量が同時に増大する、という現象である。この現象を検知するために、一日において次式を満たす場合に EF と判断するルールが経験的に構築された。

$$\text{hour}(MV_C > 0 \wedge MV_H > 0) \geq 6 \quad (8)$$

ここで $\text{hour}(\cdot)$ は、括弧内の条件を満たす時間数 [h] を、 MV_C, MV_H はそれぞれ冷/温水弁開度を表す。要するに、このルールは冷水弁と温水弁が一定時間以上同時開放されている状態は、エネルギー消費の観点から非効率である、ということを示している。本稿では、提案手法によって得られた結果に対して、その妥当性を評価するために式 (8) を使用した。

提案手法を実データに対して適用し、MDS によりマッピングした結果及び ISOMAP ($k = 10$) による結果をそれぞれ図 2、図 3 に示す。マッピング後に式 (8) のルールに対応する日と対応しない日をそれぞれマーキングしたところ、両図とも EF 検知ルール対応日がある部分に集中して示される、という結果になった。すなわち、事前知識を用いることなく、空調システムに生じたエネルギーの非効率な消費状態という大局的な状態を、低次元で直感的に表現することに成功したと言える。なお、MDS の性質ゆえ、復元される座標は原点を重心に持ち、直交変換に対する任意性が残るため、座標そのものではなく点間の相対的な配置が意味を持つ、ということに留意が必要である。

興味深い点は、ISOMAP という新しい次元削減手法と MDS という枯れた手法の間に明確な差異が見られないことである。それゆえ、本問題の場合では、計算量の観点から MDS で十分であると判断できる。ただし、データ系列がより高次元になれば、この限りであるとは断定できない。

4. おわりに

本稿では施設内の空調システムに対して、BEMS により取得されるセンサデータ系列間の関係性の類似度を反映するように低次元マッピングを行うことで、エネルギー消費に関する大局的構造を可視化するアプローチを提案した。実データへ適用したところ、専門家が特定したエネルギー消費上の無駄が発生している日に対応する点が、状態地図上に集中して配置されるという結果が得られた。このことから、BEMS の観測データだけをを用いて、建築施設内でのエネルギー消費構造を可視化することができたと結論付けられる。

5. 謝辞

本研究は、「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機

構 (NEDO) より「エネルギー有効利用基盤技術先導研究開発 / 建築設備におけるエネルギー消費上のフォルト検知技術の研究開発」として委託を受けた鹿島建設株式会社と、共同実施という研究開発体制で行われたものであり、謝意を表す。

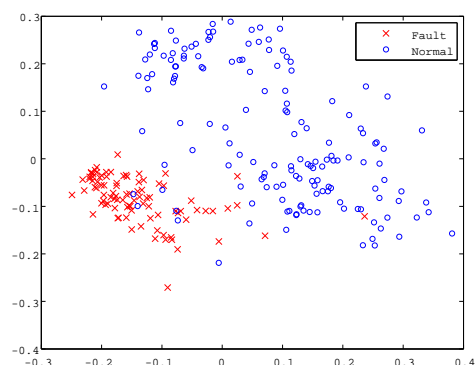


図 2: MDS による BEMS データの 2 次元マップ

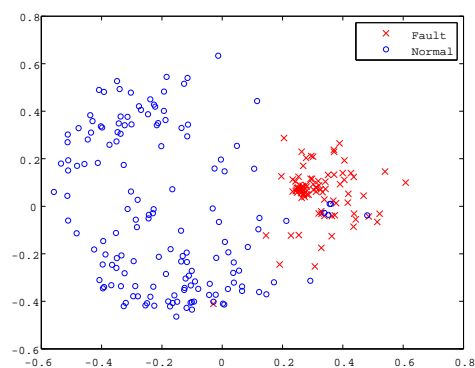


図 3: ISOMAP による BEMS データの 2 次元マップ ($k = 10$)

参考文献

- [Ide 05] Ide, T. and Inoue, K.: Knowledge Discovery from Heterogeneous Dynamic Systems Using Change-point Correlations, in *Proc. SIAM Int. Conf. Data Mining*, pp. 571 – 575 (2005)
- [Torgerson 52] Torgerson, W. S.: Multidimensional Scaling: I. Theory and Method, in *Psychometrika*, Vol. 17, No. 4, pp. 401 – 419 (1952)
- [Tenenbaum 00] Tenenbaum, J. B., de Silva, V., and Langford, J. C.: A Global Geometric Framework for Non-linear Dimensionality Reduction, in *Science*, Vol.290, No.5500, pp.2319-2323 (2000)
- [Björck 73] Björck, Å. and Golub, H. G.: Numerical Methods for Computing Angles Between Linear Subspaces, in *Mathematics of computation*, Vol. 27, No. 123, pp. 579 – 594 (1973)
- [Chatelin 93] Chatelin, F.: *Eigenvalues of matrices*, Chichester : Wiley and Sons, New York (1993)
- [Fukui 03] Fukui, K. and Yamaguchi O.: Face Recognition Using Multi-viewpoint Patterns for Robot Vision, in *Proc. of 11th Int. Symp. Robotics Research (ISRR 2003)*, pp. 192 – 201 (2003)