

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82121

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03293

研究課題名（和文）探索的分析・学習シナリオ構築過程の基礎理論と支援環境フレームワークの実証研究

研究課題名（英文）Fundamental theory on the exploratory analytics and the machine-learning scenario construction process, and experimental study on their system frameworks

研究代表者

田中 譲 (Tanaka, Yuzuru)

一般財団法人総合科学研究機構（総合科学研究センター（総合科学研究室）及び中性子科学センター（研究開発・総合科学研究センター・特任研究員）

研究者番号：60002309

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,950,000円

研究成果の概要（和文）：対象世界が単一モデル記述均質性を満たさないために機械学習精度が十分に得られない問題を、itemset miningによりデータ分割を求めセグメント毎機械学習で解決する手法を確立し、これを導入した探索的可視化分析フレームワークを開発した。強磁性体実験データ集合に適用しキュリー温度の回帰推定のR2スコアを改善した。都市規模CPSへ適用すべくLPWAを採用し、1分毎送信容量128bitの制約下で、時速125kmまでの全速度域で移動軌跡を6秒毎に誤差8m以内でサンプリング可能な技術を開発し、積雪計用定点送信ノードも使い札幌市でデータ取得実験を行い、既得統計プローブカーデータと合わせ可視化分析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械学習は対象データ集合に隠れた数学モデルを計算可能関数として求めることであるが、現実問題では、単一ではなく複数モデルが隠れている場合が多く、高いR2スコアの回帰推定を得られない場合が多い。記述子集合やアルゴリズムを試行錯誤的に適切に選ぶだけでなく、不均一なデータ集合を均一なセグメントに分割して個別に機械学習する必要がある。本研究は適切なセグメンテーションを求める新手法を提案し、機能材料探索と都市における要除排雪箇所検出に適用し有効性を示した。都市規模のモビリティ・データとセンサ・データの取得コスト低減のため、LPWAノード端末のデータ圧縮技術も確立し有効性を実証した。

研究成果の概要（英文）：ML-based regression may result in a rather low R2 score when the target objects are not uniformly modelled. We proposed a method to improve the regression R2 score. It uses itemset mining for segmenting the data set, and applies ML to each segment to obtain a regression function with a higher R2 score. We extended our exploratory visual analytics framework by exploiting this method. Its application to the experimental data set of ferromagnets improved the R2 of the regression estimation of the Curie temperature. For another application to the urban-scale CPS, we exploited LPWA, and developed a trajectory reporting node. At every minute, it reports its last 1 minute trajectory with 10 sample locations, each within 8m error. This is guaranteed at any speed up to 125 km/h. We developed another node for the fixed-point measurement of snow accumulation. These nodes' data are used with the probe car data for the exploratory visual analysis to improve snow removing operations.

研究分野：ビッグデータ応用と探索的可視化分析環境

キーワード：探索的分析・学習 探索的可視化分析 センサ・ネットワーク マテリアルズ・インフォマティクス スマート除排雪

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

(1) データ・サイエンスの重要課題が、問題とデータの特性にあう最適な分析/学習アルゴリズムの選択であることは広く認識されているが、現実の大規模応用では、対象世界が単一数学モデルで記述可能な均質性を満たすことは殆どなく、単一の回帰推定関数が予測や記述が可能になることは稀である。複数のモデルが混合している場合の機械学習に関しては、これらのモデルがパラメータ値のみが異なる同じ形の確率分布関数で表される場合には多くの研究がなされてきたが、関数自体が大きく異なる場合については特殊な場合を除き解決策がなかった。

(2) 我々はEUのFP7プロジェクトp-medicine (Personalized Medicine)に参加した際、小児腎臓ガンに対する薬剤効果の回帰推定を行う際に、 $\mu$ RNAの共起発現パターンに関して頻出パターン・マイニングを行うことにより、回帰推定を改善できるデータ分割が得られることを経験し、その一般化に関心を持っていた。このような手法を実際に用いるには、パラメータ値やメタパラメータ値を試行錯誤的に変更しながら可視化分析を繰り返す探索的可視化分析過程の支援を必要とする。

(3) この有効性を実証するために、新機能材料探索と、札幌市におけるスマート除排雪への適用による実証的評価を計画に加えた。後者では、都市規模モニタリングのデータ取得が必須で、ネットワーク通信のコストを如何に低減するかが大きな課題であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下の4つの課題を研究開発することを目的とした。

(1) 課題1: 探索的分析・学習シナリオ構築過程に対する学術的取り組みを可能とするような基礎理論の確立。

(2) 課題2: 探索的分析・学習シナリオ構築過程の支援技術として、探索的可視化分析学習環境のジェネリックな実現機構を研究し、フレームワークとして実現。

(3) 課題3: 都市規模社会サービスの効率化と、イン・シリコ・サイエンスにおける実応用で成果の有効性を検証することを旨とし、(実証研究1)札幌市における都市規模の除排雪の効率化と、(実証研究2)新機能無機材料探索に適用して有効性を実証。

(4) 課題4: (実証研究1)の基盤となる都市規模モニタリングのためのLPWAに基づくセンサ・ネットワークの研究開発。

## 3. 研究の方法

(1) 課題1に関し、派生変数、マーカー変数の動的定義を考慮した、分類/クラスタリング/回帰/機械学習/マイニングの基礎理論を、データベース理論を基盤にして構築する。既存の説明変数の関数で定義されるのが派生変数で、クラスタリング/マイニングの結果を用いて定義される説明変数がマーカー変数である。特に、異なるモデルに従うデータが混在した不均一データ集合の均一データ集合へのセグメンテーションを支援する探索的分析・学習シナリオ構築過程を研究する。

(2) 課題2では、データベース可視化フレームワークとしてよく知られた連携多重ビュー (CMV: Coordinated Multiple Views) を、代表者が拡張した連携多重可視化分析 (CMVA: Coordinated Multiple Views and Analyses) をさらに拡張し、分類/回帰/機械学習の結果の可視化も連携して利用可能なフレームワークを実現する。特にアイテムセット・マイニングによる隠れた均一データ集合の抽出・セグメンテーションと、その各々に対する回帰推定の適用による回帰推定精度の向上を目指し、この分析過程を含めてフレームワークを拡張する。

(3) 課題3の、(実証研究1)では、既得のタクシの統計ブローカーデータ、気象データ、ABS起動データのデータの活用と共に、課題4から得られる定点モニタと移動モニタのデータを用い、路線バスの定時運行を目標とするスマート除排雪の意思決定支援を目指した探索的可視化分析の試作システムを開発する。(実証研究2)では、AtomWork-Advの無機結晶材料データベースを対象にして開発フレームワークを適用して新機能無機結晶材料探索における有効性を検証する。特に強磁性材料のキュリー温度の回帰推定に関して、開発したフレームワークを適用しその有効性を検証する。

(4) 課題4では、LPWA (Low-Power Wide-Area network) に基づく都市規模センサ・ネットワークの実現性を検証する。LPWAを用いた移動体のトラジェクトリ・モニタリングと、積雪モニタリングの技術を開発しデータ取得実験を行うと共に、将来の拡張に向けたスマート・ノードのフェデレーション技術に関する基礎研究を行う。

## 4. 研究成果

(1) 探索的分析・学習シナリオ構築過程に対する基礎理論の確立

回帰推定は、記述子のベクトル $x$ と目的変数 $y$ の間の関係 $y=f(x)$ をこれらの変数の値の間の多数の関係 $D(x, y)$ を学習データとする機械学習によって、その近似 $y=f'(x)$ を求める。この時、関数 $f'$ は、機械学習アルゴリズムによって決まる関数族 $F(x, y)$ の中から選ばれる。一般には、 $y=f(x)$ を単一の $f'(F(x, y))$ で精度よく近似できるとは限らない。例として強磁性体のキュリー温度の回帰推定を行う場合、強磁性体の物理化学メカニズムは多岐にわたり、キュリー温度を決定する機構もいくつかに分かれると考えられる。これを単一の関数 $f'(F(x, y))$ で近似するには無理があり、得られた回帰推定関数 $f'$ のR2スコアが低くなると考えられる。実際、すべての強磁性体のキュリー温度の回帰推定では、記述子や機械学習アルゴリズムを工夫しても、これまでに知られている最高のR2スコアは0.816に留まっている。 $D(x, y)$ を物理化学メカニズムが同一の強磁性体ごとにデータ分割できれば、データ・セグメント毎の機械学習によって、回帰推定のR2スコアを改善できると考えられる。問題はこのようなデータ集合 $D$ のセグメンテーション

$=\{D(1), D(2), \dots, D(h)\}$ を如何に見つけるかにある。

データ集合 $D(x, y)$ を学習データ集合として、関数族 $F(x, y)$ の範囲で機械学習を行い回帰推定 $y=f'(x)$ を求める際の $k$ 分割交差検証で得まるR2スコアを $R^2_{F(x, y), k}(D)$ で表す。特に $k=3$ の場合、単に $R^2_{F(x, y)}(D)$ とする。データ集合の劣不均一性を以下のように定義する。

(1) 関数族 $F(x, y)$ に関して、データ集合 $D_1$ がより劣不均一であるとは、以下が成り立つことと同じである。

$$R^2_{F(x, y)}(D_1) > R^2_{F(x, y)}(D_2) D_2$$

(2) データ集合 $D$ のサイズよりも小さい自然数 $n$ に対し、 $D$ が関数族 $F(x, y)$ に関して、サイズ $n$ で不均一とは、以下が成り立つことと同じである。

$D$ のセグメンテーション  $=\{D(1), D(2), \dots, D(h)\}$ が存在して

(a) 各 $D(i)$ のサイズは $n$ 以上、

(b) 各 $D(i)$ は $D$ より劣不均一。

この定義は、データ集合 $D$ が関数族 $F(x, y)$ に関してサイズ $n$ で不均一な場合には、各セグメントのサイズが $n$ 以上の適切なセグメンテーションが存在して、 $D$ を学習データとする回帰推定の交差検証R2スコアに対し、セグメント毎の回帰推定の交差検証R2スコアをすべて改善できることを意味している。

対象オブジェクト集合において、隠れた関係 $y=f(x)$ を決定付ける機構の相違に関連すると想定される種々の要因の共起関係に関して、頻出パターンを求めることを考える。無機結晶強磁性体のキュリー温度の推定の場合には、このような要因として、各構成元素の最外殻電子配置と結晶中のサイト・シムトリー、結晶全体の対称性、構成元素間の結合の種類や配位が考えられる。本研究では、全3者のみを用い、最外殻電子配置は、s, p, d, fブロックの部分ブロックで表し、サイト・シムトリーは方向を無視したポイント・グループで表し、結晶の対称性も空間群の代わりにポイント・グループを採用し、これらの共起関係を928bitのビットマップで表して、アイテムセット・マイニングで頻出パターンを求めてみた。ある対象群が満たされる場合には、その部分群も満たされるようにビットマップ表現を定義した。

$c$ を化合物、 $e$ をその構成元素、 $mol\%(e, c)$ を $c$ 化合物中の $e$ 元素のモル%濃度、 $\rho(e)$ を元素 $e$ に関する論理述語、

$q(e)$ を元素  $e$ のある定量値とし、記述子として、

$$X_{e, q}(c) = \rho(e) \cdot e \cdot c \cdot (\text{mol}\%(e, c)/100) \times q(e)$$

で定義されるような値を用いることにする。本研究では特に  $q(e)=1$  の場合に限定し、142 個の記述子を用いた。

AtomWork-Adv 中の強磁性体から、キュリー温度が 200 °K 以下のものと、DFT 計算によるデータを切り捨てて整理すると、学習データ集合  $D(x, y)$  のサイズは 1596 となった。ランダム・フォレスト回帰を用いて、上記の記述子でキュリー温度の回帰推定を行うと、その交差検定 R2 スコアは 0.741 と推定には不十分な低い値になった。

$D(x, y)$  の各レコードに構成元素の最外殻電子配置と結晶中でのサイト・シンメトリ、結晶全体の対称性などの構造データを付加したデータ集合を  $D(x, y; Q)$  で表す。 $D(x, y; Q)$  の各レコードをトランザクション、各レコードの構造情報  $Q$  から構成される共起関係のビットパターンをアイテムセットとして、最小サポートを 100 としてアイテムセット・マイニングで頻出パターンを求めると、4,479,814 個という膨大な数の頻出パターンが求まった。これはアイテムセット・マイニングの欠点としてよく知られている問題であるが、今の場合は、頻出パターンの全てが強磁性の物理化学メカニズムに関係しているわけではなく、別の物性のメカニズムに関係している可能性がある。ある頻出パターンが強磁性の物理化学メカニズムに関係しているのであれば、対応するサポートを学習データ集合としてキュリー温度の回帰推定を求めれば、その交差検定 R2 スコアは高い値を示すと考えられる。見つかった頻出パターンの各々のサポートを学習データ集合として回帰推定の R2 スコアを求め、これをスコアの降順にソートすると、先頭から 113,168 個のパターンのサポートまでで  $D(x, y)$  を完全に被覆する。これらを基本パターンと呼ぶ。多くの場合、基本パターンすべてを考慮する必要はなく、累積被覆が一つ前の基本パターンを真に含む基本パターンのみを考えればよい。このような基本パターンを必須パターンと呼ぶ。この問題では 182 個に限定できる。未知材料のキュリー温度を回帰推定するには、その構造情報から各パターンを満たすか否かが判断可能な場合には、この 182 個の必須パターンを先頭から調べ、最初にこの材料が満たすものを求め、これに対する回帰推定関数を用いて値を求めればよい。構造情報が不明の場合でも、構成元素が分かる場合には、これらの構成元素をすべて含む強磁性体を  $D(x, y)$  から求め、これらすべてに満たされる先頭基本パターンを求め、その回帰推定関数で推定すればよい。この場合、必須パターンのみではなく、基本パターンを順に調べる必要がある。

このような回帰推定では、強磁性体全体の 80% (70%, 60%, 50%) に含まれる未知材料は R2 スコアが 0.848 (0.866, 0.889, 0.902) という高い精度でキュリー温度を推定できることが明らかになった。100% をカバーしようとする最悪の R2 スコアは 0.754 となるが、セグメンテーションを行わない場合の R2 スコア 0.741 よりは改善されている。

### (2) 探索的可視化分析学習環境のジェネリックなフレームワークの構築

データベース可視化フレームワークとしてよく知られた連携多重ビュー (CMV: Coordinated Multiple Views) と、申請者がこれにクラスタリングとマイニングの結果の可視化ビューを導入して拡張した連携多重可視化分析 (CMVA) を基盤とし、これにアイテムセット・マイニングによる隠れた均一データ集合の抽出・セグメンテーションと、その各々に対する回帰推定の適用による回帰推定精度の向上を目指す (1) の成果を、トランザクションのヒートマップ表示と選択、基本パターンのリスト表示と選択、必須パターンのリスト表示と選択、回帰推定結果の表示などのビューと共に導入し、CMVA の拡張を実現した。

### (3) 都市規模社会サービスの効率化と、イン・シリコ・サイエンスにおける実応用で成果の有効性を検証する実証実験

#### 都市規模社会サービスの効率化に関する実証実験

以前から蓄積してきたタクシー路線バスのモビリティ・データを用い、探索的可視化分析によって、札幌市における除排雪に関するいくつかの仮説の検証を行った。

図 1 は路線バスのルートと、赤で示される複数のバスの運行ダイヤと、左から 2 番目の運行ダイヤに相当するバスの実際の走行記録を青で示して比較したものである。路線バスが運行ダイヤから大きくずれて遅れの原因となっている箇所が、左折コーナーを開始点とする後続の少数の道路リンクであることがわかる。左折の際、コーナー除排雪が充分でないことから、曲がりにくく見通しが悪くなり速度を大きく落とさざるを得ない状況になるためである。右折に関しては、左折程の影響がないこともわかる。



図 1 路線バスの 1 ルートとそのダイヤと運行記録  
(赤：複数のバスの運行ダイヤと、青：左から 2 番目のダイヤに対する実走行記録)

図 2 左図は、冬季のある日の午後 6 時の交通状況に関して、道路リンクごとの平均速度をある補正をしたのちに可視化したものである。平均速度をそのまま表示をした場合には、速度低下が降雪の影響によるものか、冬季以外にも渋滞を起こす道路リンクであるためかどうかが判断できない。そこで、冬季以外の同じ道路リンクの同じ曜日、同じ時間帯の平均値と、現在の平均速度とを比較し、速度低下率を計算して色のグラデーションで表示している。赤が 30% 以上の低下、緑が 15% の低下、青が 5% 以内の低下に相当する。この図を見ると、除排雪の出動判断を行う午後 6 時の時点で、冬季以外の平均速度に対して、30% 以上の速度低下を伴う深刻な渋滞が、かなり広範囲で分散して生じていることが分かる。市の中心部は殆ど全面的に 15% 以上の速度低下を起こしていたことも観察できる。交通への影響は、午後 6 時の時点で、早急な除排雪の必要性を示している。

図 2 の右図は冬季の別の日の交通状況を同様に可視化したものである。2 日前から強い降雪が続き、除排雪作業が連日行われたもののとても追い付かなかった。この図を見ると、市の広範囲エリアでほとんどの道路リンクが赤色になっており、冬季以外の平均速度に対して 30% 以上の重大な速度低下が生じていたことを示している。ブロックを囲む各道路リンクが渋滞し、渋滞回避を不可能にするグリッドロックが殆ど全域で生じており、もはや災害状態であることが見て取れる。

この 2 例から明らかなように、冬季以外の平均速度に対する速度低下率の可視化表示は、除排雪の緊急性とその箇所を特定し、除排雪作業の優先度を求めるのに非常に効果的な手法である。



図 2 冬季以外の平均速度に対する現在の速度低下率の道路リンクごとの可視化表示  
(赤：30%以上の低下、緑15%の低下、青：5%以下の低下)

図3は(2)で確立した探索的可視化分析フレームワークに基づいて、スマート除排雪のためのデータ分析用に開発した探索的可視化分析システムである。



図3 スマート除排雪のためのデータ分析のために開発した探索的可視化分析システム

図3の左図では、対象データ集合は、24時間時計や地図を用いて、任意の場所の任意の時間帯のデータ集合へと自在に絞り込むことができる。平均速度のチャート上で任意の速度区間を指定すれば、その区間の平均速度を持つ道路リンクのみに絞り込まれる。クラスタリングは、道路リンクごとの平均台数と平均速度の2種類で2種類のクラスタリングが行われている。クラスタリング結果の可視化ビュー上で、任意のクラスタを選べば、そのクラスタに含まれる道路リンクのみに絞り込みがなされる。

図3の右図では、右端にヒートマップが示されている。X座標は道路リンク番号で、地図上で選ばれた領域内の道路リンクの集合を示している。Y座標は5分ごとの時間間隔を4日分示している。この4日間は左上のチャートで示されており、最初の日は無降雪、次の2日間は強い降雪、最後の1日は除排雪後の無降雪の日であった。ヒートマップのセルの色は、平均速度を表しており、黒が時速0km、赤を最大速度としてグラデーションで表示している。青はその時間帯にデータがなかったことを示す。ヒートマップにおいて、平均速度に時速10kmの閾値を設け2値化を行うと、各時間帯をトランザクション、道路リンクをアイテムとして、アイテムセット・マイニングが可能である。この時求まるパターンアイテム集合は、渋滞を同時に起こすことが多い道路リンクの集合を表している。つまり、(1)で述べた手法で、道路リンクをセグメンテーションしている。このシステムは、探索的可視化システムとして実現されているので、左上の4日間を示すチャートで、降雪前の1日、降雪中の2日間、降雪後でかつ除排雪後の1日の3条件を選び、3つの異なる色で示すと、これらの絞り込み条件は他の可視化や分析結果にも反映され、同じく3色で対応部分が色分けされて表示される。パターン・マイニングの結果を見ると、頻出パターンのリストが、その色で絞り込まれる道路リンク集合にのみ現れるパターンと、いずれの色の絞り込み集合にも共通に現れるパターンとの4種類のリストに分類されて表示されている。

このシステムを用いると、図4のように、降雪前に共起していた渋滞道路リンクの集合、降雪中に共起していた渋滞道路リンクの集合、降雪後で除排雪後に共起していた渋滞道路リンクの集合の3つに分けて独立に表示することも可能である。これらと比較すると、冬季においては、降雪前から渋滞の種子となる道路リンクが存在し、降雪により、この種子となる道路リンクを中心に渋滞区間が広がり、やがて飛び飛びの列島状であった渋滞区間が繋がり、大渋滞を生じることが、降雪が止み除排雪が行われると、元の列島状に戻るが見取れる。

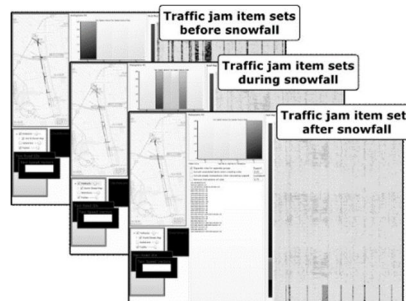


図4 探索的可視分析によって明らかとなった渋滞の種の検出と渋滞区間の拡大

#### イン・シリコ・サイエンスにおける実応用で成果の有効性を検証する実証実験

(1)で述べたように、強磁性体の実験データ集合に提案手法を適用することにより、キュリー温度の回帰推定を高いR2スコアで行うことが可能になったので、これを用いて、 $A_xNd_{2-2x}Fe_{14}B$ の化学式を持つ未知強磁性体のキュリー温度を、元素Aは{Sc, Y, La, Ce, Pr, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta}の中から選び、 $x$ を $0 \leq x < 2$ の範囲で0.1刻みで変化させ、すべての材料に対し網羅的に回帰推定を試み図5を得た。この回帰推定では、Nd, Fe, Bの3種類の元素を含むすべての強磁性体を $D(x, y)$ から見つけ、これらすべてが満たす基本パターンの中で最も高いR2を持つものを見つけ、このパターンに対する回帰推定関数を用いた。この基本パターンは357番目の基本パターンで、R2は0.8908で、サポートのサイズは309である。この309個のデータを学習データとして用いて回帰推定関数が求められている。このR2は十分に高く、回帰推定結果の精度が良いことを示している。実際、交差検定によるMAEとRMSEは $42.1^\circ$ と $64.4^\circ$ となり、キュリー温度の推定誤差としては充分小さいと言える。

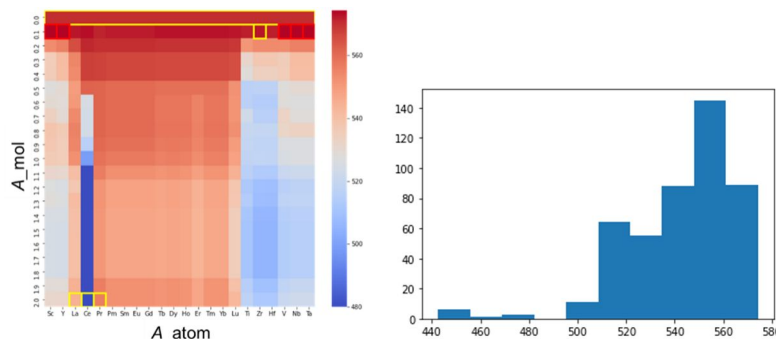


図5 未知材料 $A_xNd_{2-2x}Fe_{14}B$ のキュリー温度の回帰推定結果のヒートマップ表示(黄枠で囲まれた材料は既知材料。赤枠で囲まれた未知材料が最も高いキュリー温度を持つと推定された。)

以上の結果から、上記のような無機結晶材料の特性の回帰推定に、本研究の成果が有効であることが実証された。

(4) 都市規模モニタリングのためのLPWAに基づくセンサ・ネットワークの研究開発

都市規模の実時間モニタリングでは、使用する膨大な数のセンサの低価格化と、これらのセンサ群から得られるデータを準実時間で安価に中央サーバに送信・収集可能な低価格の通信ネットワーク・サービスが必須である。本研究では、SONYのLPWA (Low Power Wide Area Network) ELTRESを採用し、低価格で高いデータ圧縮機能を持った、定点観測センサノードと、歩行速度から自動車の高速移動までの軌跡記録が可能な移動体位置センサノード、さらには定点観測センサノードと組み合わせて用いる低コストの積雪定点観測センサの研究開発を行い実証実験と評価を行った。

図6は、札幌市でのELTRESの商用サービスが開始される前に、実験受信システム用に試作開発した移動体用送信ノード端末、定点観測用送信ノード端末と積雪計用、商用サービス用に新たに開発した小型汎用送信ノード端末の写真1点を示す。



図6 実験受信システム用に試作開発した移動体用送信ノード端末、定点観測用送信ノード端末と積雪計用、商用サービス用に新たに開発した小型汎用送信ノード端末

ELTRESは見通し距離100kmの広範囲のモニタリングが可能で、ノード端末は送信機能のみを持ち受信機能はないが、低消費電力で低通信コストであることから多数のノードを用いた都市規模モニタリングには適している。専用チップはGNSSを搭載しており、移動体の位置センサとして活用するのに適するが、1分ないし3分間隔のデータ送信毎に、128bitのデータしか送信できないという大きな制約があり、高速移動体の軌跡や、低速ではあるが前進後退の切り替えが頻繁な除排雪作業車の動きのモニタリングには適さないと考えられてきた。本研究では送信間隔  $T$  ( $T=1$ 分 or  $3$ 分)の間の移動軌跡を  $N$  点の等時間サンプルで、サンプル点毎の位置のずれ誤差を  $d$  m 以内に保ってデータ圧縮して送信することで、128bit中の100bitのみの送信量でどこまでの高速移動 ( $V_{max}$  km/h) 時の詳細な軌跡が送信できるかを理論的に解明し、送信ノード端末のファームウェアとして実装した。その結果、表1に示す種々の圧縮スキームを実現した。

表1 移動体軌跡の圧縮送信スキームの例 (左表:  $T=1$ 分, 右表:  $T=3$ 分)

$N$	$\Delta$ sec	maximum error $d$ m	maximum speed $V_{max}$ km/h
30	2	4	7
12	5	8	100
10	6	8	125
		16	250
		32	500

$N$	$\Delta$ sec	maximum error $d$ m	maximum speed $V_{max}$ km/h
18	10	4	8
10	18	8	42.5
		16	85

左表の3番目のスキームは、1分送信モードを用いた場合、0~125 km/hの速度範囲で、6秒ごとにGNSSの位置データを8m以内の誤差で圧縮符号化し、先行1分間の軌跡をこのような10点のサンプル点の位置として送信することができることを示している。誤差を16m以内と緩和すれば0~250 km/hまでの移動速度に対応できると示している。除排雪作業の細かな動作のモニタリングであれば、1行目のスキームを用いれば、時速7km/hまでの移動速度に対して、2秒間隔のサンプリングで、30点の位置の変化を誤差4m以内で送信可能である。このスキームを用いれば除排雪車の細かな動きから作業内容の把握も可能である。

移動体位置センサ送信ノード端末を車に搭載し、一般道路並びに高速道路を用いて市内を広範囲に移動し、上記の性能で軌跡の取得が可能であることを実証した。積雪センサと結合した定点観測送信ノード端末を市内の3箇所に設置し、降雪時期の積雪量の変化の取得が可能であることを実証した。これらを多数用いての市内全域の本格的モニタリングに適用するには、今後の予算措置が必要である。

定点でのマルチセンサの統合送信のための圧縮技術の研究開発と、地域BWAとの連携による階層的モニタリングの研究開発も着手し、可能性を示す結果を得ているが、本格的な研究開発は今後である。地域BWAを用いて、WiFi接続で監視カメラを簡便に設置し、無人の屋外パーキング場の人と車の出入りを検出するシステムに関しては試作開発を行い有効性を検証した。

今後、LPWA送信ノード端末、地域BWAを用いたWiFi端末、スマートフォン、P2Pでこれらと近傍通信可能なセンサノード群など、コストと性能が異なる多様な無線通信ネットワークを用いて、多様な機能・性能のスマート・オブジェクトが相互に連携動作可能な階層的ネットワーク環境が整備されることにより、スマート・オブジェクト間のアドホックな近傍近接連携を活かした複雑で多様なアプリケーション・シナリオの実現が可能になると予想される。一方、このようなスマート・オブジェクト間のアドホックな近傍近接連携を活かした複雑で多様なアプリケーション・シナリオの記述法やそのベースとなる計算モデルは未だ十分には研究されていない。このような背景を受けて、本研究では、このような計算モデルとして代表者が研究を行ってきたグラフ書き換えルールと触媒ネットワーク計算モデルに基づく理論モデルを精緻化し、セキュアな連携を保证するために、生体における代謝反応をセキュアに行うために細胞膜が大きな役割を果たすことにヒントを得て、細胞膜のように触媒反応ネットワークの任意の部分を外部から見えないように保護するための膜スマート・オブジェクトを導入し、セキュアな連携を保证するアプリケーション・シナリオの記述法を新たに確立した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 田中謙	4. 巻 58
2. 論文標題 マテリアルズ・インフォマティクス：機能無機材料探索に於けるコンピュータ・サイエンティストの展望	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 光触媒	6. 最初と最後の頁 4-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuzuru Tanaka	4. 巻 1197
2. 論文標題 Proximity-Based Federation of Smart Objects: Its Application Framework for Complex Secure Federation Scenarios	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 87-100
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-44900-1_6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Keisuke Takahashi, Lauren Takahashi, Itsuki Miyazato, Jun Fujima, Yuzuru Tanaka, Takeaki Uno, Hiroko Satoh, Koichi Ohno, Mayumi Nishida, Kenji Hirai, Junya Ohyama, Thanh Nhat Nguyen, Shun Nishimura, Toshiaki Taniike	4. 巻 11(4)
2. 論文標題 The Rise of Catalyst Informatics: Towards Catalyst Genomics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ChemCatChem	6. 最初と最後の頁 1146-1152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/cctc.201801956	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 田中謙, 藤間淳, 高橋啓介
2. 発表標題 マテリアルズ・インフォマティクス：機能無機材料探索における機会と課題
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会, シンポジウム「インフォマティクスが創る新しい材料科学とその実用化」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中 譲
2. 発表標題 マテリアルズ・インフォマティクス：機能無機材料探索における機会と課題
3. 学会等名 情報統合型物質・材料開発イニシアティブ最終報告会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Randy Goebel, Yuzuru Tanaka
2. 発表標題 Big Data and AI for Materials
3. 学会等名 Transcending Incrementalism; Advanced Materials Symposium 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuzuru Tanaka
2. 発表標題 Proximity-based Federation of Smart Objects: Its Formal Modelling and Application Framework
3. 学会等名 10th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE 2018)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuzuru Tanaka, Randy Goebel
2. 発表標題 Applying AI in COVID-19
3. 学会等名 Prince Takamado Japan Centre Webinar（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Dimitris Kotzinos, Dominique Laurent, Nicolas Spyratos, Yuzuru Tanaka, Rin-ichiro Taniguchi (ed.)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 187
3. 書名 Information Search, Integration, and Personalization - 12th International Workshop, ISIP 2018, Communications in Computer and Information Science 1040	

1. 著者名 Giorgos Flouris, Dominique Laurent, Dimitris Plexousakis, Nicolas Spyratos, Yuzuru Tanaka (ed.)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 150
3. 書名 Information Search, Integration, and Personalization - 13th International Workshop, ISIP 2019, Communications in Computer and Information Science 1197	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------