

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04456

研究課題名(和文)既存複数建物の空調システムを配管で結び省エネを図るサーマルグリッド実用化開発研究

研究課題名(英文)Development of practical thermal grid system, which connect AC systems of existing buildings with pipes, accomplishing energy conservation

研究代表者

磯崎 日出雄 (Isozaki, Hideo)

神戸大学・産官学連携本部・特定プロジェクト研究員

研究者番号：50737161

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)：サーマル・グリッド・システム(ThGS)は、主として既存の複数建物の空調負荷と熱源を、熱媒(冷温水)の流し方が柔軟に切替えられる管路網システムで接続し、更に送水温度を可変にすることで、空調負荷処理効率化を図るシステムである。このシステムを社会実装するためには、計画段階の効果予測、運用段階で設定選択を行うツールが必須であると考え、ThGS運転最適化ツールの開発を行った。また併せてThGSを円滑に運用するために必要な、翌日の空調負荷の予測法について、数理計算要素と学習要素を組み合わせる手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境省の試算では、2030年に国として46%削減を実現するためには、業務その他部門において51%省エネルギーが必要であるとしている。この目標実現のためには、新築建物のZEB化もさることながら、20億 m^2 弱存在すると推定されている法人等の非住宅建築物ストックの省エネ化は喫緊の課題である。

既存業務ビル・ビル群に対して適用できれば省エネポテンシャルの高いThGSではあるが、製造冷水温度、配管ネットワークの切り替えに設定値選択肢が多く、計画時の省エネ評価、運用時の設定値選択が難しいという問題を抱えている。その問題を解決する、ThGS運転最適化ツールを開発した。

研究成果の概要(英文)：The Thermal Grid System, abbreviated as ThGS, connects the air-conditioning demands and heat sources, i.e. chillers or heaters, of multiple buildings, mainly existing, with a pipeline network system that allows the flow paths of heat medium, i.e. chilled water or hot water, to be flexibly switched, and also makes the water supply temperature variable. This system aims to improve the efficiency of air conditioning processing. In order to implement this system in the country, we thought that a tool for predicting the effects at the planning stage and selecting settings at the operation stage would be essential, so we developed the ThGS optimum operation selection tools.

We also developed a method that combines mathematical calculation elements and learning elements to predict the next day's air conditioning load, which is necessary for smooth operation of ThGS.

研究分野：理工系 工学 建築学 建築環境設備

キーワード：サーマルグリッドシステム 学習型空調負荷予測 べき乗項積型空調機数値モデル 冷却塔・冷凍機統合モデル 変冷水送水温度

1. 研究開始当初の背景

2016年に発効したパリ協定において、日本は2030年に2013年基準で温室効果ガスの26%削減を約束した。その後、2021年の地球温暖化対策計画では、その数値を46%減に強化し、50%減に向けて挑戦するとしている。また、2020年には菅総理大臣が2050年カーボンニュートラル宣言を行っている。

環境省の試算では、2030年に国として46%削減を実現するためには、業務その他部門において51%省エネルギーが必要であるとしている。この目標実現のためには、新築建物のZEB化もさることながら、20億㎡弱存在すると推定されている法人等の非住宅建築物ストックの省エネ化は喫緊の課題である。

2. 研究の目的

インテックス大阪において、2013年～2015年環境省委託事業の中で「サーマル・グリッド・システム*1(以下ThGSと記す)」の実証事業が行われた。既存ストック建物の空調省エネ化に成果を上げたが、今後の普及展開を図るためには、計画時点にThGSの効果を予測するツールと、実運用時点で各種設定の最適値あるいは準最適値を選択するツールが不足していると思われた。そして実は両ツールは利用時点こそ異なりはするが、内容的には設計上あるいは運用上の多数の設定の中から最適なものを選ぶという同種の機能を持つものであると考えられる。本研究の目的はThGSの計画と運用を支援する、空調負荷予測、機器のモデル化、運転シミュレーション、最適化の機能を持つ計算ツールを開発することである。

*1 ThGSとは、主として既存の複数建物の空調負荷と熱源を、熱媒(冷温水)の流し方が柔軟に切替えられる管路網システムで接続し、変送水温度制御を導入し、空調負荷処理効率化を図るシステムである。

3. 研究の方法

建物の空調システムは建物ごとに一品生産であり、多種多様である。機器の容量や数量の違いを考えれば建物の数だけ、空調システムがあると言って過言ではない。空調システムのバリエーションに対応する汎用的ツール作成を目指すのは将来の課題とし、本研究では現実的で具体的な2例のThGSについて検討を行った。1例目は一建物を対象とする、変冷水送水温度システムを持つThGSであり、2例目は小規模の共通熱源を持ちつつ二建物間で熱融通を行うThGSである。研究は以下の5ステップで進めた。

(1) 空調(冷房*2)負荷予測

冷水温度変更、冷凍機切替、配管ルートの変更を伴うThGSを運用するためには、最低でも1日程度未来の空調負荷予測を行い、翌日の運転モードを仮決めしておくことが空調設備の安定的運用を保つためには必要であると判断した。負荷予測が一定以上外れた場合には運転モードの変更を行うのは言うまでもない。幸い既存建物を主たる研究対象としているため、運転実績データが入手可能と考えられる。多量の運転実績データを利用して簡便に精度の高い負荷予測をする方法を考案した。

*2 本研究では冷房時のみを研究対象とした。

(2) 空調システム設計

建物Aと建物Bの空調設備の設計を行った。建物Aは運転データが入手できた神戸三宮地下街主要部の設計内容を踏襲しつつ一部簡素化したものとした。(三宮地下街の冷凍機はリフォームされている。)建物Bは架空の延べ床面積20,000㎡の事務所ビルを想定して設計した。空調システムは基本的に建物Aと同構成としたが、築30年の既存冷凍機をそのまま使用する想定とした。

(3) 空調要素のモデル化

設計事例に含まれる空調用各種機器の数値モデルを作成した。特に空調機については「さんちか」の実機1台を借りて高冷水温度領域について実験を行い、得られたデータを使ってべき乗項積型モデルを作成、検証した。他の機器については、既存文献あるいはメーカーカタログ・技術資料調査によってモデル制作をしたが、ThGSの低温冷却水、中高温冷水を利用する領域のデータ収集については特にメーカーにヒアリングを行った。

(4) テストデータとしての外気条件と冷房負荷の選定

最適化計算のテストラン用としては、数日分の時間毎負荷値と時間毎外気条件が必要であった。「さんちか」の負荷実績と空衛学会の設計情報データベースを参考にして、冷房期間における冷房負荷実績のピーク日、75%日、50%日、25%日を代表日とし、その日の負荷と気象条件のセットに対して最適化プログラムを適用した。

(5) シミュレーションと最適化

先行研究であるインテックス大阪における実証で使用したモデルでは最適性と求解速度を考慮して線形モデルによる数理計画法と商用ソルバによる最適化を実施していた。またそのため、空調システムにおける非線形要素を省略したり、量子化などの工夫により簡易的に考慮していたが、本研究では精度向上などを狙い、非線形モデルとして構築し直した。そのため要素モデルおよびその接続部モデルを実装し、事例設計に基づき想定するシミュレーションモデルを構成し、運転に必要な、計画支援ツール、運用支援ツールを実装した。各要素機器モデルをそのままモジュール化し、柔軟な変更対応に配慮した。また選出した代表日に基づく運用シナリオ例（解空間の設計およびパラメータ群の設定）を構成した。

4. 研究成果

(1) 負荷予測

負荷を計測値とその計算によって妥当な予測が可能な要素（数理計算要素）と機械学習手法によって計測値との相関関係から導く要素（学習推論要素）に分けて予測する手法を構築した。「さんちか」の運用データに対して、過去時点に立ち戻ってこの予測手法を適用し、実測負荷との比較を行ってその予測精度を検証した。提案手法による推定結果を図-1に示す。縦軸が推定結果、横軸が対応する実測値であり、**R2** 係数で**0.62**となった。また**NN**法の推定結果にあらかじめ差し引いていた数理計算要素の負荷を足し戻した場合、つまり数理計算要素の予測が完全だと仮定した場合の負荷全体の推定結果は**R2**係数で**0.88**となった。

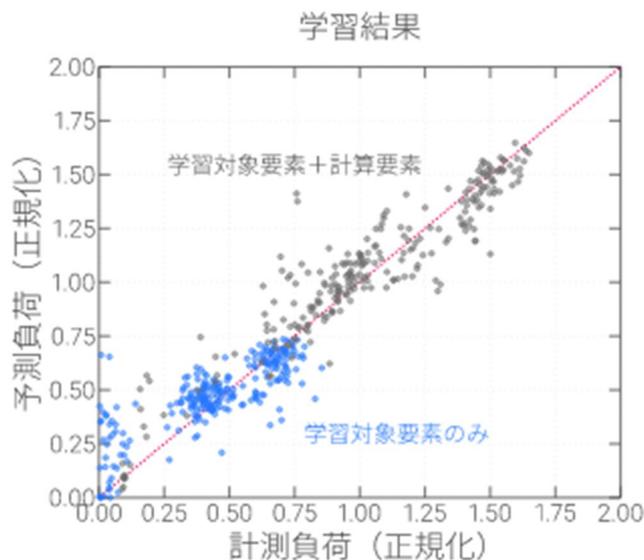


図 - 1 推定結果

(2) 空調システム設計（一建物事例）

一建物事例の空調系統図を図-2に示す。また主要機器リストを表-1に示す。本検討では本来ゾーン別に複数台あるべき空調機を統合空調機として1台に統合して扱った。各空調機別の流量データ、冷水返り温度データが入手できなかったための処置である。

(3) 空調要素のモデル化（一建物事例）

空調機モデル

統合空調機はべき乗算式でモデル化した。即ち、

$$\frac{q_t}{q_{t0}} = \left(\frac{V_w}{V_{w0}}\right)^{c_2} \times \left(\frac{t_a - t_w}{t_{a0} - t_{w0}}\right)^{c_3} \times \left(\frac{t_b - t_w}{t_{b0} - t_{w0}}\right)^{c_4}$$

ここに、

- q_t : 全熱冷却処理能力[kW]
- V_w : 冷水流量[l/min]
- t_a : 吸込み空気乾球温度[]
- t_b : 吸込み空気湿球温度[]
- t_w : 冷水入口温度[]
- V_{w0} : 基準冷水流量[l/min]
- t_{a0} : 基準吸込み空気温度[]
- t_{b0} : 基準吸込み空気湿球温度[]
- t_{w0} : 基準冷水入口温度[]
- q_{t0} : 基準全熱冷却処理能力[kW]
- $c_2 \sim c_4$: パラメータ[-]

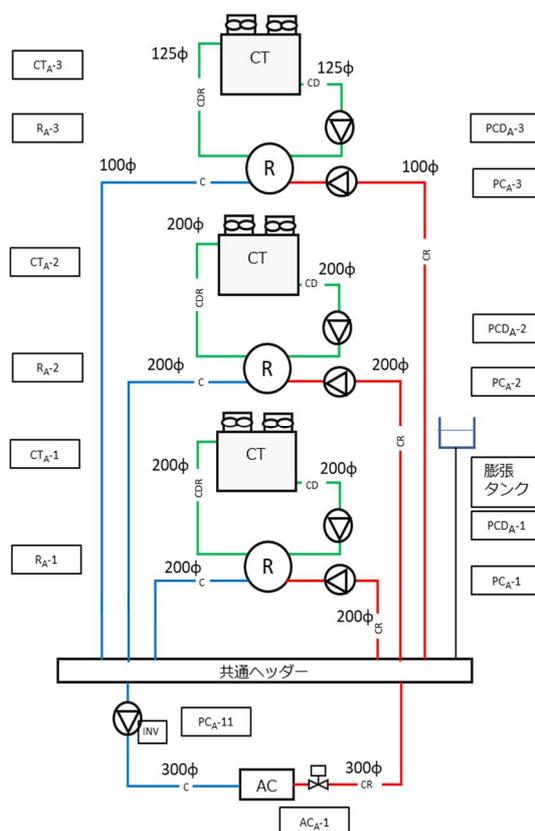


図-2 空調配管系統図（一建物事例）

2,365点の1時間間隔の空調2次側実測データを使用して、基準値およびパラメータ値を決定

した．一例として図-3 に統合空調機 AC_A-1 の特性グラフを掲げる．

冷凍機モデル

冷凍機メーカーから提供を受けた性能を数値モデル化した．図-4 に作成した性能曲線例を示す．

冷却塔モデル

基本的に冷却塔モデルは「JIS B 8609:2008 強制通風式クーリングタワー性能試験方法」に則って組んだ．但し冷却水入口温度が標準設計温度から乖離する運転が考えられるので冷却水平均温度による補正を行った．

ポンプモデル

低負荷時に中高温冷水を利用する **ThGS** では，往き返り温度差が採りにくくなるため，従来運転法に比べてポンプ流量は増加する傾向がある．そのためポンプの消費電力を正しくモデル化する必要があるが，定速ポンプ，インバータポンプ共，**BEST** 機器特性マニュアルに載っているデータを利用した．

(4) シミュレーションと最適化（一建物事例）

従来研究からシミュレーションモデルの表現能力や精度向上を狙い、機器モデルと接続部モデルからなる非線形な建物モデルを構築した．

しかし、非線形化によって既存のソルバが使用できず最適化プログラム（解探索プログラム）の構築が必要となり、また一部の変数の値を定めるのに収束計算が必要になったりと計算時間が大幅に伸びたため、計算例の規模において十分と思われる最適性をもった解を導出することができなかった．

(5) 空調システム設計（二建物熱融通事例）

二建物熱融通事例の空調配管系統図を図-5 に示す．また主要機器リストを表-2 に示す．建物 **A** と建物 **B** を 2 重ループで結んでおり、2 重ループには小型の共用熱源 **Rc-1** が接続されている構成である．建物 **A** は熱源機器のリニューアルが行われたため、高効率の冷凍機が設置され、低負荷時には余裕の出る建物 **A** から **B** に熱融通を行う想定としている．更に、負荷が小さく、冷水が十分低温であるタイミングには、リターンループよりリターン冷水を取り出しカスケード利用できるように切替配管が組まれている．

(6) 2 重ループ配管部分の計算の考え方（二建物熱融通事例）

一建物事例では運転する冷凍機と冷水出口温度を設定すれば、各配管を流れる冷水量は比較的簡単に求められた．しかし、2 重ループで 2 建物と共用熱源を結ぶ場合は、そう簡単ではない．2 ノードを結ぶルートが複数あるため、各アークの流量を得るためには、圧力 流量の関係式、ヘーゼン・ウィリアムスの非線形方程式を連立して解く必要がある．未だ構想段階であ

表-1 主要機器リスト（一建物事例）

記号	名称	仕様	台数
R _A -1,2	インバーターターボ冷凍機	冷凍能力：1,160kW 定格運転時 COP5.65	2
R _A -3	水冷モジュールチラー	冷凍能力：320kW 定格運転時 COP4.2	1
CT _A -1,2	開放式冷却塔	冷却水量：236.1m ³ /h 風量：170,016kg/h 冷却水：37 32 ， @WB = 27 塔特性 U/N = 0.8892	2
CT _A -3	開放式冷却塔	冷却水量：68.2m ³ /h 風量：170,016kg/h 冷却水：37 32 ， @WB = 27 塔特性 U/N = 1.0111	1
AC _A -1	統合空調機	風量：430,000CMH (固定) 機外静圧：508Pa 冷却能力：3,455kW	1

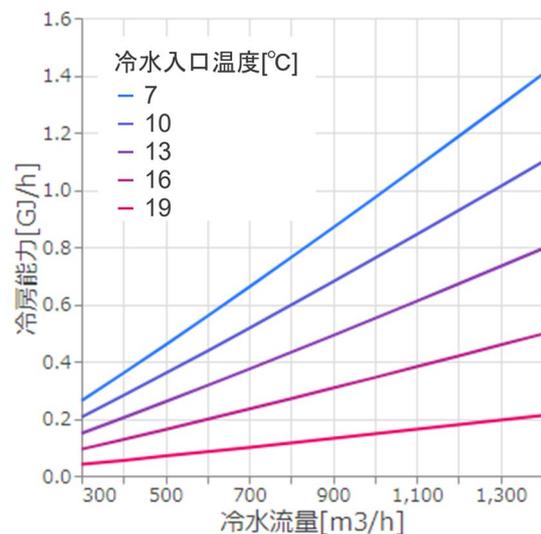


図-3 AC_A-1 のモデルの特性グラフ

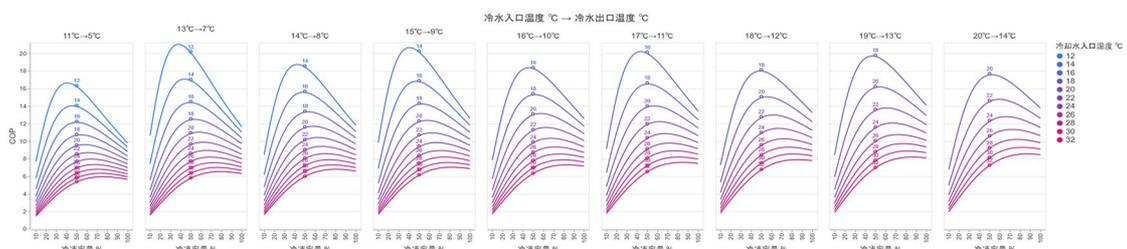


図-4 R_A-1,2 の性能曲線

るが、場合分けとして、熱源出口温度設定（適切なピッチで）×熱融通パターン選択（10通り）×ループ内外を結ぶ出入り流量仮定（融通パターンにより自由度がある場合）を考える。今回のネットワークでは、ノード圧力10ヶ、アーク流量10ヶがループ内未知数となる。（図-6参照）

(7) まとめ

ThGS の計画・運用を支援する、最適化ツールの開発を行った。

既存建物・建物群に対して **ThGS** を適用した場合に、運用時に必要となる、翌日の天気予報を変数とする空調負荷予測法を考案した。

次に現実的な2事例の **ThGS** 空調設備設計を行い、それらに対する、数値モデル化、シミュレーション、最適化の適用を試行した。「一建物事例」については、最適化ツール実装までを完了したが、計算時間の問題があり、最適性を持った解を得るに至っていない。より複雑な「二建物熱融通事例」については、モデル化までが完了している。

事例研究を実施して、**ThGS** のモデル化、シミュレーション、最適化のアルゴリズムを獲得し、また未解決の課題も明らかになった。

今後シミュレーションの計算量を削減し、運用最適解を導出し、**ThGS** 導入省エネ効果を明らかにする。更に設計条件・仕様を振って計算し、**ThGS** のシステム設計の要点を整理したい。

(8) 謝辞

研究にあたり多くのデータ提供して頂いた神戸地下街株式会社の皆様に感謝申し上げます。また空調機のモデル化についてご指導を頂いた大阪公立大学名誉教授の中尾正喜先生に深謝いたします。

<引用文献>

- 大原，磯崎：「機械学習を用いた既存建物の空調負荷予測方法」、『空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集』（2023.3.7）
- 小田 et al.：「空気調和機の冷却コイル特性同定モデルの研究（第1報）」、『空気調和・衛生工学会学術研究発表会論文集』（2023.3.7）

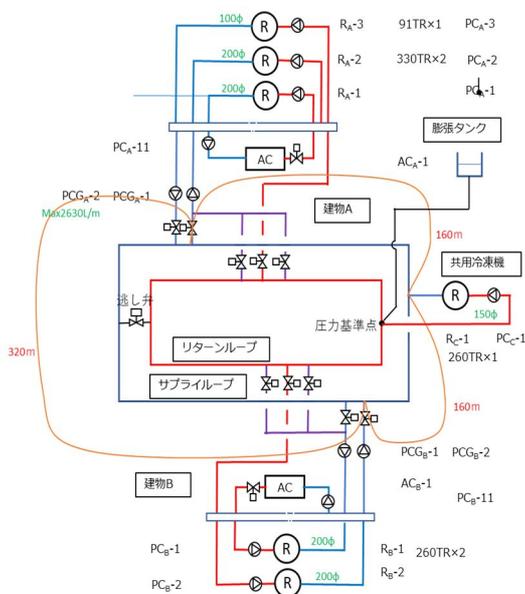


図-5 空調配管系統図
(二建物熱融通事例)

表-2 主要機器リスト(二建物熱融通事例)
建物B用、共用のみ記載。建物A用は一建物事例と同一

記号	名称	仕様	台数
R _{B-1,2}	定速ターボ冷凍機(建物B用)	冷凍能力: 914kW 定格運転時 COP4.8 (旧式の冷凍機を想定している)	2
R _{C-1}	インバータターボ冷凍機(共用)	冷凍能力: 914kW 定格運転時 COP5.65	1
CT _{B-1,2}	開放式冷却塔(建物B用)	冷却水量: 202.8m ³ /h 風量: 126,984kg/h 冷却水: 37 32 , @ WB = 27 塔特性 U/N = 1.0059	2
CT _{C-3}	開放式冷却塔(共用)	冷却水量: 184.9m ³ /h 風量: 117,680kg/h 冷却水: 37 32 , @ WB = 27 塔特性 U/N=0.9894	1
AC _{B-1}	統合空調機(建物B用)	風量: 216,800CMH 機外静圧: 508Pa 冷却能力: 1,742kW	1

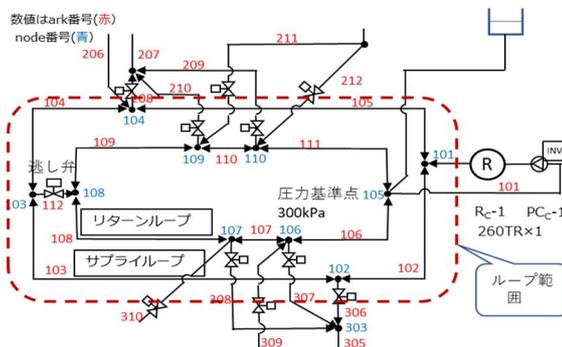


図-6 ループ部配管ネットワーク図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大原 誠, 磯崎 日出雄
2. 発表標題 機械学習を用いた既存建物の空調負荷予測手法
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 磯崎日出雄、中尾正喜、小田久人、藤堂聖真
2. 発表標題 空気調和機の冷却コイル特性同定モデルの研究（第2報）某地下街空気調和機への適用例
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小田久人、中尾正喜、藤堂聖真、磯崎日出雄
2. 発表標題 空気調和機の冷却コイル特性同定モデルの研究（第1報）グレーボックスモデルの設定と同定精度の検討
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大原誠 松本卓也 鈴木義康 榊原一紀 長廣剛 玉置久
2. 発表標題 開放部を持つ地下街での空調運用のための人密度予測手法
3. 学会等名 電気学会 システム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大原誠 磯崎日出雄
2. 発表標題 開放部を持つ地下街における機械学習による空調負荷予測手法
3. 学会等名 電気学会 システム分野横断型新システム創成合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 進藤宏行 鶴見隆太 鈴木義康 早川嘉朗 長廣剛 磯崎日出雄 竹林英樹
2. 発表標題 屋外への開放部を持つ空間における人流・気流センサを用いた空調制御手法の開発・実証（第1報）開発・実証システムの概要と実証1年目の結果
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大原誠 長廣剛 松本卓也 鈴木義康 榊原一紀 玉置久
2. 発表標題 開放部を持つ地下街における人流に基づいた空調運用実証 - 点群データによる人流推定
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大原誠
2. 発表標題 人流予測に基づく地下街空調システム運用実証
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 計測・制御・システム工学部会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大原誠 松本卓也 鈴木義康 長廣剛 玉置久
2. 発表標題 LRFを用いた地下街における人流推定手法
3. 学会等名 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大原誠 松本卓也 鈴木義康 長廣剛 玉置久
2. 発表標題 LRFによる点群データを用いた地下街における人流推定手法
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大原誠 松本卓也 鈴木義康 長廣剛 玉置久
2. 発表標題 二次元点群データを用いた地下街における人流推定手法
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門 システム研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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
研究分担者	大原 誠 (Ohara Makoto) (10633620)	神戸大学・産官学連携本部・特定プロジェクト研究員 (14501)	

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
---------	---------