

課題番号: 13-MD05

## 大規模計算機空気冷却風速場の高解像度解析と 適応的クラウドロボット技術による実効的な計測融合オペレーション

東田 学 (大阪大学)

概要: これまで、大規模計算機室の空気冷却風速場の流体シミュレーションにおいて、粗い精度であれば、京 1 ラックぐらいの計算能力で実時間シミュレーションが実現可能であることを確認した。本年度は、大阪大学サイバーメディアセンターが来年度に竣工を計画している IT コア棟を対象として、建築設計と並行して、高精度モデルデータの作成と実時間シミュレーションの可否の検証を進めている。また、絶えず変化する環境下で適応的に重要な計測データ取得ポイントを認識し、そのポイントのデータを取得できるロボット計測システム技術として、特に自律的にホットスポットを特定する行動を行えるクラウドとロボットの協調制御方式を研究開発した。

### 1. 研究の目的と意義

これまで本グループでは、格子ガス法超並列計算手法を利用することにより、大規模計算機の空気冷却風速場に関する実時間シミュレーションを、現実には十分確保可能な規模の計算機能力で実現可能であることを示した。さらに、風速計等のセンサーから得られる時系列計測データをもとに格子ガス法計算モデルを時々刻々補正することによって、現実に近いシミュレーション結果を得て、これを実際の空調機等の操作に適応的に反映させる計測融合オペレーションシステムの検討を行ってきた。

本研究の目的は、より精度の高い計測融合オペレーションを実現するために、シミュレーション結果と計測データを大規模分散ファイルシステムに蓄積し、時系列および局所位置情報を踏まえた解析処理を行い、より適切な計算モデル補正を行う手法の研究開発と、より適切な観測データを取得するためのネットワーク制御ロボットによる巡回監視手法の研究開発を行っている。具体的には、まず、現実の大規模計算機空気冷却システム室 (例: “京コンピュータ” 施設の計算機室及び空調機室と大阪大学サイバーメディアセンターの主機室) を解析対象にして、空気冷却風速場の実時間シミュレーション結果を大規模分散ファイルシステムである HDFS に蓄積し並行データ解析を可能とするシステムの研究開発である。一方、簡易気象計測装置を搭載したネットワーク制御ロボットを

現実の大規模計算機室に巡回させ、その巡回観測結果を同様に HDFS に蓄積するシステムの研究開発も並行して行っており、双方のデータを時系列および局所位置情報を踏まえて逐次対比する手法として、次の図に示すような Hadoop を介して複数のロボット間で共有した情報を基に機械学習を行って推定・推論を行うことができる iRooHa (inter-ROS Organization on Hadoop) フレームワークの研究開発を進めている (図 1)。本フレームワークでは、計算機室を巡回する実ロボットが取得するセンサー情報をブリッジおよびゲートウェイ・モジュールを介して Hadoop/HBase によるビッグテーブル型データベースに蓄積する。蓄積される情報は、Hadoop ジョブによって、適宜、解析処理を行うが、本フレームワークでは、ジョブを構成する Hadoop タスクとしてマッピングされるノード上に仮想ロボットを生成し、実ロボットが行っている解析処理を並行オフローディングする。この際に、ビッグテーブルから仮想ロボットへセンサー情報の受け渡しを行うためのブリッジ・モジュールを開発している。今後は、リダクションに際して機械学習による推定・推論を行うモジュールの開発を目指している。

これによって、(1) 格子ガス法計算モデルを時々刻々補正することによって、センサーの設置されていない場所も含めた全体の風速場について、現実に近いシミュレーション結果を得ることを目指す。さらに、(2) より精度の高いシミュレーション結果を得るた

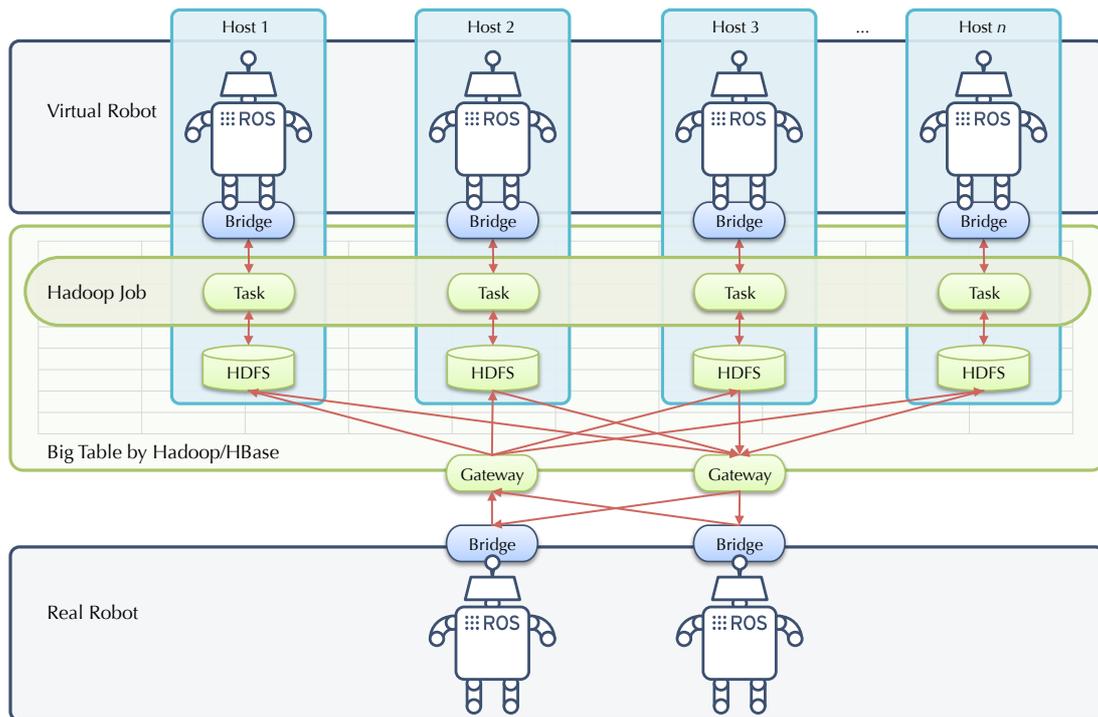


図 1: Hadoop を介した複数の実ロボットおよび仮想ロボットによる協調制御の概念

めに必要となる計測点を導出する手法を確立し、その地点へネットワーク制御ロボットを派遣することによって、より適切な計測データの取得を行うための制御手法を研究開発する。

以上の成果は、ペタフロップスを超える大規模計算機の空気冷却に関する計測融合オペレーションシステムの構築に資するものであり、これによって、本研究は、(1) 筐体内の電子部品にやさしい過渡変化を実現して高信頼性・長寿命化を目指す運転と、(2) 冷却・空調・電源系を含めた計算機システムプラント全体のエネルギー効率向上を目指す運転の両立に貢献できるものになる。また、(3) 計算機センターの異常時にもネットワーク制御ロボットの派遣による一次オペレーション対応と過渡変化シミュレーションに基づく異常解析が可能になることを目指す。

本研究の意義は、以下のとおりである。

ペタフロップスを超える超並列高速計算機システムでは、数メガワット以上の巨大な発熱を伴うばかりでなく、その発熱分布は広範囲に広がり、計算機システムのジョブスケジューラによる計算ノードの割当て・解除、各種プログラムのエラー発生、計算機ハードウェアの故障のほか、これらに伴う筐体ファン自動

オンオフや、故障の修理保守後の起動、さらには、計算機システムの冷却・空調・電源系におけるトラブル発生で予測できない形状変化をする。他方、従来型の冷却制御は、液冷システム、空冷システムともに、計算機冷却場の入口温度と入口流量を確保し、各筐体では、温度や湿度がある制限値を超えた場合に電源オフにすることで計算ボード等の電子装置の保護を行っている。

今後の大規模計算機システムにおいては、上述のとおり、異常な過渡変化の過程が多様化するため、従来の制御方式では、定格温度や定格湿度から大きなオーバーシュートやアンダーシュートが生じる可能性が高い。これらは、制限値に達すれば、稼働率の低下、達しない場合でも、電子部品の信頼性や寿命の低下を招く。このため、各種センサー情報とシミュレーションから過渡変化の全体像を的確に把握し、冷却システムの制御を適応的に実行する“計測融合オペレーション”を可能にする技術の構築がきわめて重要である。

本実現に際して、これまで環境監視に用いられてきた定点センサーやサーモグラフィによる遠隔センサーに代わり、ホットスポットに環境監視装置を派遣で

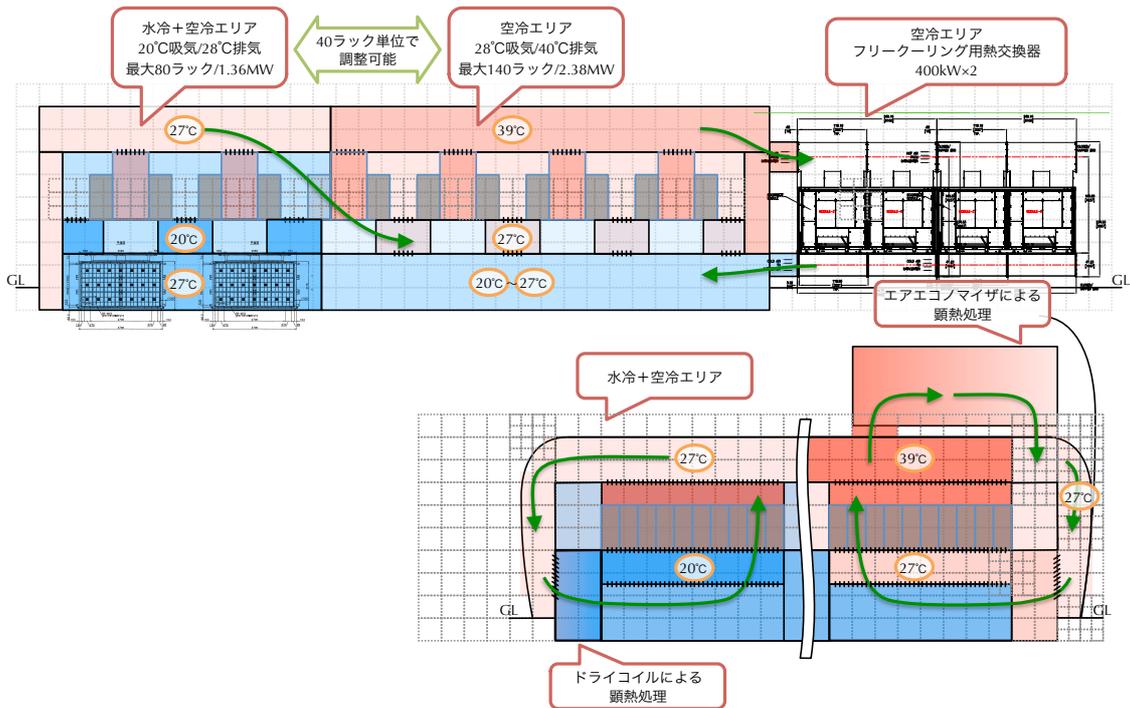


図 2: IT コア棟の概念設計

きるネットワーク制御ロボットによる巡回計測手法を導入することは、研究開発が立ち上がりつつあるクラウド・ロボティクス分野との活発な技術交流が期待できる。クラウド・ロボティクスは、多数のロボットがクラウドで情報を共有することによって、自律的な群体制御を行ったり、人間と情報共有するために、Google 社などを中心に研究開発が進められている新領域である。さらに、情報基盤センター群の計算機資源を、クラウド技術を用いたデータ解析に利用するという新機軸へ誘導できる。

## 2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

### (1) 共同研究を実施した拠点名および役割分担

- 阪大: 統括およびネットワーク制御ロボットによる巡回監視の検討
- 東北大: 計算機の高度化利用支援
- 九大: OpenFOAM の高度化利用支援

### (2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野

### (3) 当公募型共同研究ならではの事項など

本グループが目指す「計測融合オペレーション」の実証的な研究開発に際して、実際の大規模計算機

室を対象として、3D モデルの作成、複数の移動センサーによる巡回監視の試運転、空調やスーパーコンピュータシステムの試運転と合わせた固定センサーおよび移動センサーのキャリブレーションなどの現場作業はもとより、現場の実測データから得られた情報の実時間シミュレーションへフィードバック試験やプログラムの効率化など、拠点関係者と研究グループが一体となった協力活動を効率よく行うことができる。

## 3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

### (1) 研究成果の詳細について

#### (1-1) 建築設計と並行した CFD シミュレーション

昨年度の補正予算によって、大阪大学サイバーメディアセンターにスーパーコンピュータの運用に特化したデータセンター「IT コア棟 (仮称)」の建設が認められた。これを受けて、本研究課題の実施対象を、課題申請時のサイバーメディアセンター本館主機室から IT コア棟に変更し、建築設計と CFD シミュレーションを並行して行った (図 2)。

これまで、本研究課題では、計算機室と空調設備を同じフロアに併設するサイバーメディアセンター

主機室のような計算機室や、計算機室と空調設備室を二層構造とする「京」コンピュータの計算施設を対象として、計算機室の空気冷却風速場の解析を行ってきた。これらの知見を活かし、独立棟として新設が認められた IT コア棟の空調設計を CFD シミュレーションによって徹底的に最適化する取り組みを行った (4 月～7 月)。この CFD シミュレーションに際しては、工期を逆算すると非常に限られた期間内で確実に実施する必要があり、世界的に有数のデータセンターでの利用実績がある商用アプリケーション“6SigmaDC”を利用することとした。設計要件としては、平成 27 年秋に更新を予定している大阪大学サイバーメディアセンターの次期スーパーコンピュータシステムの運用を想定した。

設計に先立って、基本的なモジュール構成として、ラック列とそれらに囲まれる通路 (aisle) をどのように給気・排気に利用するかを検討から始めた (図 3)。この検討・検証の結果、IT コア棟においては、通常データセンターよりもラック列の間隔を 1.5 倍広く取り、コールドアイルへ床または天井から給気し、ホットアイルはキャッピングして天井と壁に排気する基本モジュール構成を採用した。また、高効率のエアハンドラや熱源装置、さらに将来的に高圧直流給電や廃熱回生装置を設置することを考慮して、地球シミュレータや「京」と同じく二層構造型として、一層と屋上にそれらの装置を設置出来るように考慮した。

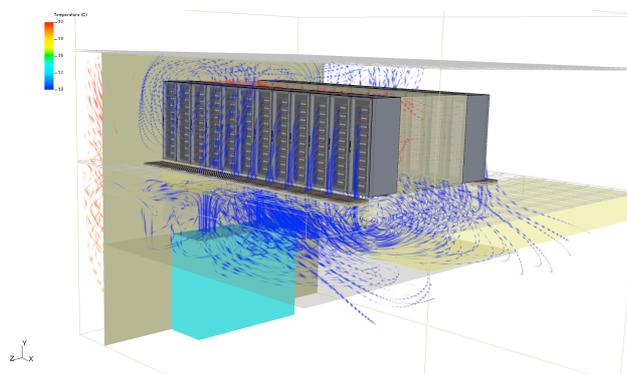


図 3: 6SigmaDC によるモジュール構成の検討

この 6SigmaDC によるモジュール構成の解析と並行して、格子ガス法によって同規模のモデル、またはその組み合わせを実時間解析することが可能か検証を進めた (図 4、図 5)。

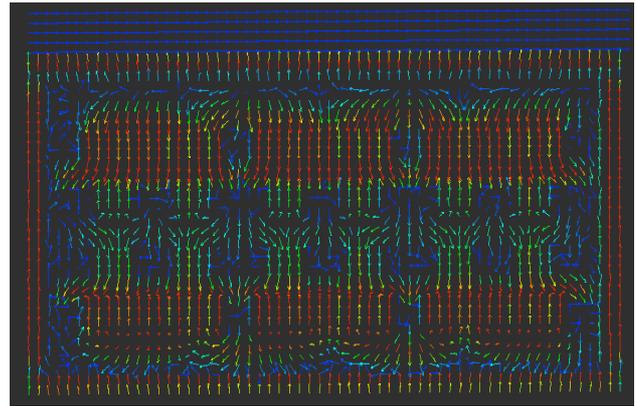


図 4: 格子ガス法による検証 (二層目)

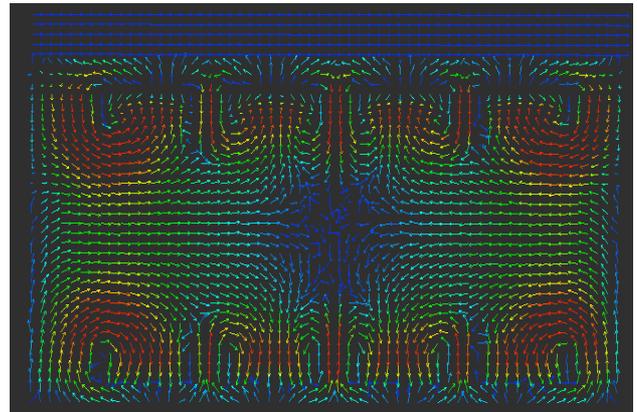


図 5: 格子ガス法による検証 (一層目)

最終的に、これらの空調要件と、建築設計上の要件を織り込んだ全体モデルを 6SigmaDC 上で作成した (図 6)。この全体モデルを基に、シミュレーションを繰り返して最適化し (図 7、図 8)、建築および空調設計に余すことなく反映することができた。IT コア棟は、平成 25 年 12 月に着工し、平成 26 年 9 月に竣工を予定している。

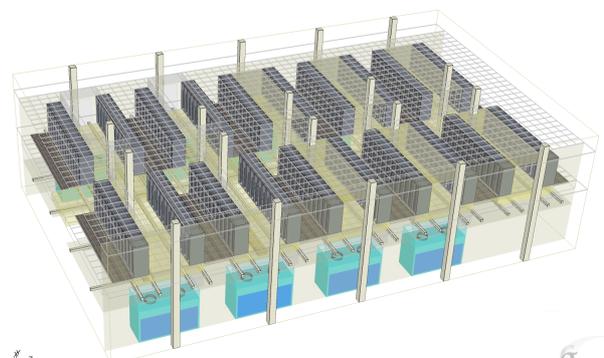


図 6: IT コア棟のリファレンスモデル

6SigmaDC による最適化に際しては、実環境におけ

る温度、風速、圧力測定の本ベンチマークとすべき観測点を特定するために、収束判定の効率的な見極めが可能な観測点を経験的に見いだした。当該箇所には、継続的に環境観測を行う固定センサーを設置する予定である。この取り組みについては、2013 年 10 月に開催された電子情報通信学会のクラウドネットワークロボット研究会 CNR にて発表を行った (研究成果リストの国内会議発表 [4-1])。

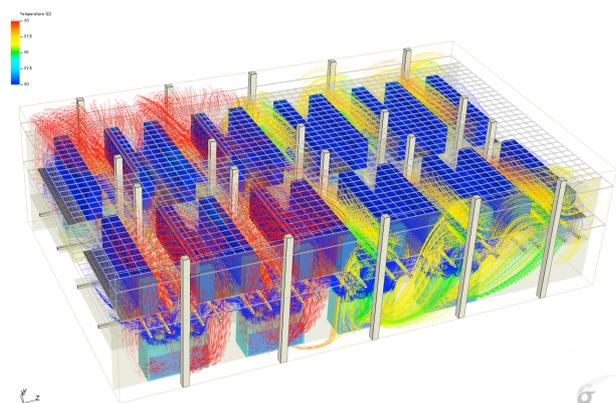


図 7: 熱搬送流線の解析結果

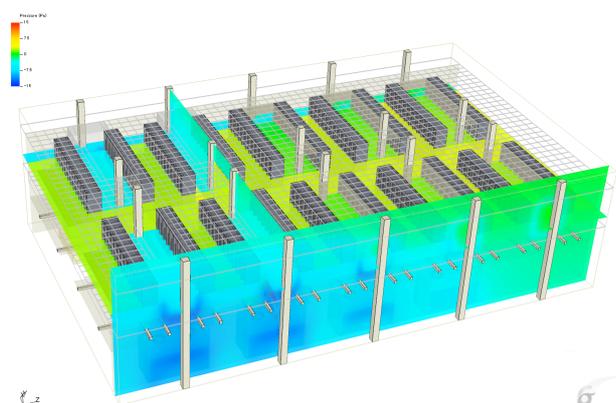


図 8: 圧力分布の解析結果

また、現在、最終設計図面を元に、格子ガス法用のモデル作成を行っており、配置する格子点数と計算機的能力・計算時間の関連性の検証を行っている。

**(1-2) 観測データの変化に自律応答する巡回制御**

一方、計測融合オペレーションのもう一つの構成要素である移動型センサーのクラウドを介した制御については、IT コア棟の建設が具体化したことを受

け、より実証性を高めるために、まず、恒常的な環境観測のための時系列データ蓄積を行うクラウド環境の整備と、シミュレーションと実際の観測データ

との整合性を刻々と検証するための準備を進めている。さらに、より精度の高い移動型センサー制御技術を検討し、さらに、迅速に異常値を検知するための割り込み制御を導入するための研究開発を進めている。

**(1-2-1) クラウドへの時系列データ蓄積**

昨年度の最終報告書に示したように、大阪大学サイバーメディアセンターでは、昨秋から稼働を開始しているクラスター型汎用コンピュータシステムにおいて、Hadoop/HBase と同時に OpenTSDB (Time-Series Database) を整備し、大規模計算機システムの認証を伴って時系列データを逐次蓄積するための要素技術導入を進めてきている。さらに、本研究で採用しているロボット制御のミドルウェア ROS を拡張し、これらのクラウドサービスと連携するためのブリッジ・モジュールの開発も行っている (図 9)。

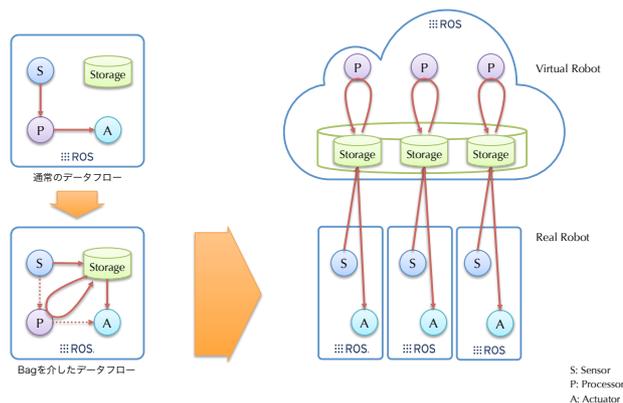
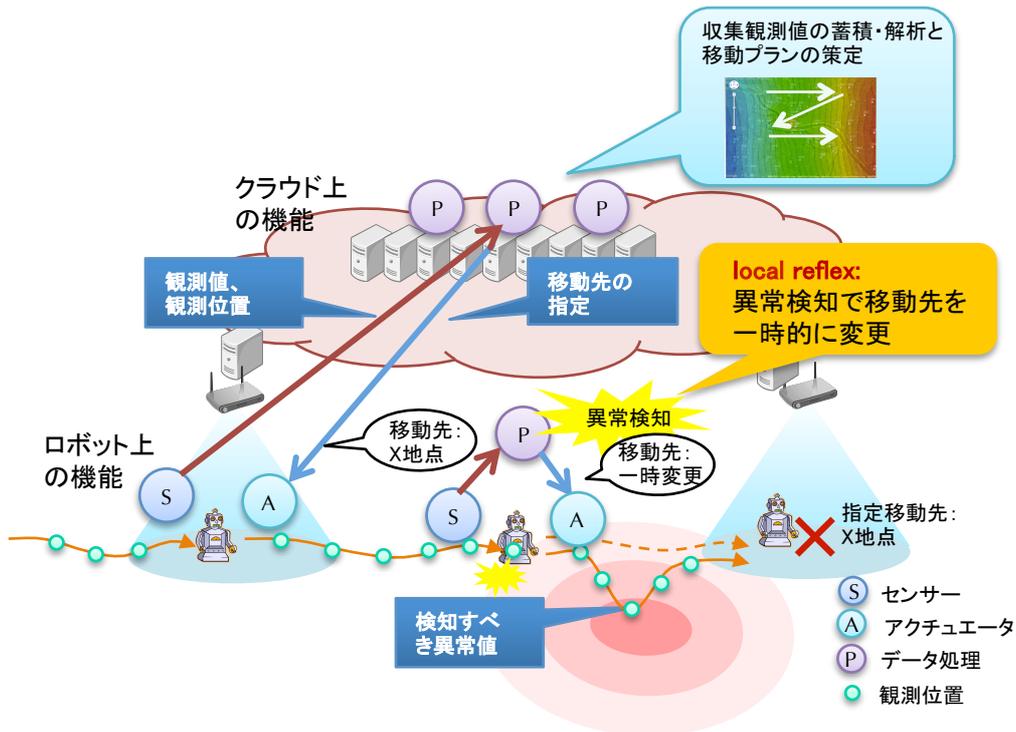


図 9: ROS のクラウド化の概念

本年度は、前節で示したように、6SigmaDC によるシミュレーションを繰り返し、定常状態と異常状態を判定することが容易な特徴的固定観測点の割り出しを行っている。それらの観測点に固定センサーを設置し、恒常的な環境監視を行なう。それをクラウド上に時系列データとして蓄積し機械学習による推定解析によって、異常状態が高精度で検知可能となるよう準備を進めている。

**(1-2-2) 異常状態を迅速に検知するための移動制**

御  
昨年度の最終報告書に示した通り、これまで、ROS と ROS のリファレンスプラットフォームである



Turtlebot によって、計算機室を巡回監視するための機能を容易に実現することが可能である。また、計算機室という電波状況の不安定な環境で通信が途絶した際に、複数の通信チャネルを使い分け、かつ、データ蓄積を分散して行う P2P 型のメッセージ交換技術を導入することで、移動型センサーにおいても目的とする継続的なデータ取得が可能であることを示した。

昨年度の課題であった移動精度の向上については、オドメトリ・センサーの検出精度が向上した Turtlebot2 を導入することによって、必要な精度を確保することができた。

さらに、6SigmaDC によるシミュレーション結果を検証する過程で、IT コア棟のように、スーパーコンピュータを設置する区画と汎用的な PC サーバを設置する区画を区切りなく併設した場合、冷却に必要な風量差から圧力差が生じ、均質な定常状態は設定可能であるが、計画的な稼働ノード縮退や障害によるノード停止に伴って、ラックの配置状況によっては吹きだまりによってホットスポットが生じる場合があることが判明した。移動型センサーによる巡回に際しては、このようなホットスポット発生による環境変化を迅速に検出可能な自律反射的な制御の必要性を確認した。現在、巡回中にクラウド上の時系

列データを遡って環境変化の差分を検知した際に、その周囲にホットスポットが出来ていないかを迅速に検知するために、移動型センサーであるロボットが自律反射的に行動を起こす自律反射制御方式の研究開発を進めている。

具体的には、図 11 に示すように、巡回ルートを構成する目的点の集合であるグローバルゴールと、ロボットが環境変動を検知しホットスポットを特定するための逡巡移動を行うためのローカルゴールという概念を導入した。

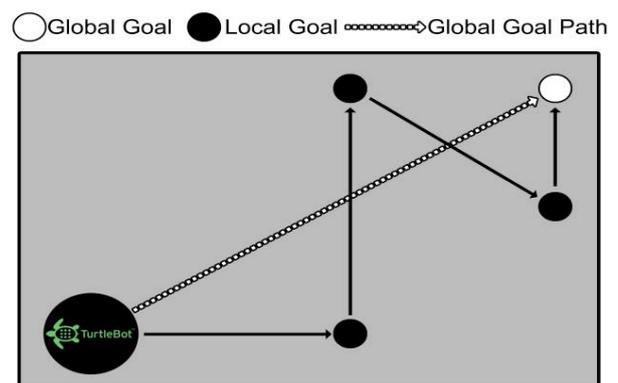


図 10: グローバルゴールとローカルゴール

グローバルゴールは、クラウド側から設定することによって、複数のロボットによる協調制御が可能になる。ローカルゴールは、ロボットがクラウド側から取得する時系列環境計測データとの差分を検知

した際に、自律反動的に自己位置の近傍に設定し、ホットスポットを特定する動作を行う。このような制御を可能とする ROS のモジュール構成 (図 12) を提案し、2014 年 2 月に開催される CNR 研究会にて発表を行った (研究成果リストの国内会議発表 [4-2])。さらに、2014 年 7 月に開催される国際ワークショップ BIOT2014 にて発表を行う予定である (研究成果リストの国際会議プロシーディングス [2-1])。

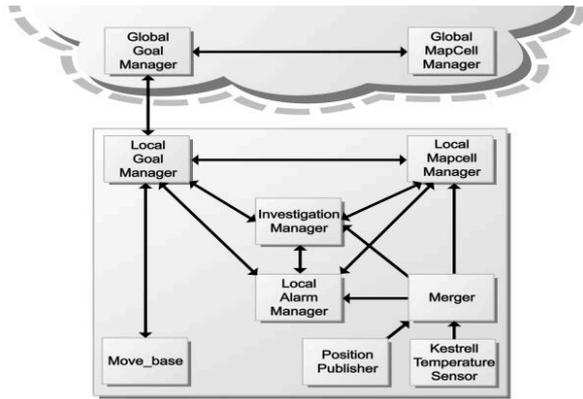


図 11: クラウドを介したゴールの設定

## (2) 当初計画の達成状況について

研究計画においては、(1) 空気冷却風速場のシミュレーション解析と評価と (2) ネットワーク制御ロボットによる巡回監視と連動する計測融合オペレーションシステムの構築を行う事になっていた。

(1) については、計画時点では、大阪大学サイバーメディアセンターの主機室を解析対象とすることとなっていたが、前章で紹介した経緯によって、解析対象を来年度に竣工を予定している IT コア棟へ変更した。これによって、実際の運転環境とシミュレーション結果を直接的に比較検証することが先延ばしとなってしまったが、これを補うために、実績のある商用アプリケーション 6SigmaDC を導入し、設計の初期段階の基本モジュール構成の検討時点から格子ガス法によるシミュレーションとの比較を行い、小規模なモジュール構成から検証を始めることができた。最終的な建築設計をモデル化し、実運転の際に要求される解像度を実現可能な格子点数、計算時間、計算機の能力の評価を行い、運用時のシステム構成、環境変化や障害発生を想定したパラメータ・スタディを行い、シミュレーション結果のデータベ

ース化を進めている。

(2) については、ネットワーク制御ロボットの自己位置推定能力を実運用に足りる精度に高めるために、センサー精度を高めたロボットを導入した。一時的な遮蔽物を検知し、妨げられることなく巡回できるようになったことを確認しており、クラウドに観測データを蓄積し、安定的な巡回に目途が立っている。本年度は、前章で示したように、6SigmaDC による最適化の過程で問題となっている運用構成の変化にもなう非安定状態を迅速に検知可能なクラウドとロボットの協調制御方式に焦点を当てて研究開発を行った。クラウドのコンピューティング・リソースおよびデータベースと協調するネットワーク連携型ロボット制御方式に対する知見を蓄積し、特に、データセンター内で想定される不安定な無線ネットワーク環境において、本研究で開発した手法を取り入れることによって安定した巡回を行いつつ、非正常状態の迅速な検知が可能であることを確認した。その際、クラウドのコンピューティング・リソースを活用することで、ロボットのバッテリー駆動時間を延ばす事が可能であることを確認した。

## 4. 今後の展望

これまでの研究開発成果を活用し、次年度は計測融合オペレーションの実現を目指している。

まず、2014 年夏には、本研究によって設計を最適化し最適観測地点に定点センサーを設置した IT コア棟が竣工する。定点センサーの時系列観測データはクラウドへ格納しビッグデータとして処理を行う。その際、あらかじめパラメータ・スタディを行ったシミュレーション結果との適合性を判定し、想定した非正常状態に陥っていないか否かを適宜監視し、適切な障害対応を促す事を検討している。

同時に、稼働型センサーとして本研究で検討を進めてきたロボットによる巡回監視が実用的か否かの検証を行う予定である。このために、より安定した巡回が可能となる産業ロボットの導入を検討している。

## 5. 研究成果リスト

(1) 学術論文 (投稿中のものは「投稿中」と明記)

(2) 国際会議プロシーディングス

[2-1] Fredrik Nordlund, Manabu Higashida, Yuuichi Teranishi, Shinji Shimojo, Masanori Yokoyama and Michio Shimomura, "Designing of a Network-Aware Cloud Robotic Sensor Observation Framework", in Proceedings of IEEE BIOT2014 (Big Data Management for the Internet of Things), T.B.A., July 2014.

(3) 国際会議発表

(4) 国内会議発表

[4-1] 東田 学, “クラウドネットワークロボットによるデータセンターの自動運用支援”, CNR2013-16, 電子情報通信学会技術研究報告, 信学技報, Vol.113, No.248, pp.33-38, 2013 年 10 月.

[4-2] Fredrik Nordlund, Manabu Higashida, Yuuichi Teranishi and Shinji Shimojo, “A Proposal of a Cloud Robotic Sensor Observation Framework integrating Global Movement Plan and Local Measurement Feedback”, CNR2013-18, 電子情報通信学会技術研究報告, 信学技報, Vol.113, No.432, pp.7-12, 2014 年 2 月.

[4-3] 東田 学, “広域分散ファイルシステムに基づく「ビッグテーブル」型の超大規模データ処理系の構築と機能および性能評価」および「大規模計算機空気冷却風速場の高解像度解析と適応的クラウドロボット技術による実効的な計測融合オペレーション”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 第 1 回ネットワーク型学際研究シンポジウム, 2014 年 3 月.

(5) その他（特許, プレス発表, 著書等）