

令和 6 年 1 月 9 日現在

機関番号：82121

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11286

研究課題名(和文)ワイヤレスネットワーク上の組み込みコンピュータを分散オブジェクト化する研究開発

研究課題名(英文)Development of distributed object model for embedded computers on WiFi network

研究代表者

金谷 範一 (Noriichi, Kanaya)

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：20150013

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文):組み込みコンピュータ用にJava Remote Method Invocation(RMI,遠隔メソッド呼び出し)オブジェクトと互換性がある非同期遠隔オブジェクトプロトコルモデルを設計開発した.組み込みコンピュータが収集制御するデータはRMI遠隔オブジェクトとして機能する(組み込み分散オブジェクトモデル).クライアントは遠隔メソッド呼び出しを実行しても,他のジョブを並行で継続でき,後で実行完了通知を確認できる.組み込みコンピュータ(48MHz)上およびRMIサーバ(3.1GHz)上の遠隔呼び出しの実行時間をWLAN上で計測した結果,RMIの1.67から15.4%の高速動作時間を達成した.

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究による組み込み分散オブジェクトモデルは非同期型で遅延が少なく,リソースも少なくすむ.ネットワーク上のクライアントからは組み込みコンピュータを遠隔オブジェクトとしてみなせるため,計測制御系やモニタリングシステムに応用できる.組み込み分散オブジェクトモデルにより,センサネットワークをインターネット等の上位ネットワークに統合し,高速化,並行処理を期待できる.気象観測,農業耕作管理,火山地震観測網,河川洪水観測リアルタイムモニタ,地震津波広域沿岸観測モニタ,放射線モニタなどを目的とするセンサネットワークなどを容易にインターネット等に接続できるため,その効果と応用範囲を拡張できる.

研究成果の概要(英文):To make multiple sensors/devices accessible over a wireless local area network (WLAN) for measurement, control, and monitoring purposes, such a system comprises a client and multiple embedded computer-based servers deployed in remote places. To apply the advantage of distributed object models, such as Java Remote Method Invocation (RMI), the model cannot work on an embedded computer because it demands sufficient resources, including the processing power of the CPU, memory, and an operating system. An asynchronous remote object protocol for embedded computers (eASROP) is designed and implemented to enable an embedded computer and its acquired data to masquerade as an RMI-compatible remote object on a server. The results of performance measurements demonstrated that, for the eASROP on an embedded computer-based server (48MHz), the extra execution time that the client experienced was 1.67%--15.4% of that for the RMI on a PC-based server (3.1GHz) on a WLAN.

研究分野：コンピュータサイエンス 分散オブジェクト ネットワーク 計測制御

キーワード：measurement system distributed object model embedded computers computer network control system Remote Method Invocation

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。

## 様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ネットワーク上において複数のコンピュータにより計測制御およびモニタリングシステムを構築するには分散オブジェクト技術 Java RMI(Remote Method Invocation, 遠隔メソッド呼び出し)を採用して構築する事が多い。一例としてRMIはスペイン王立南極観測基地における国際科学実験用観測計測系を、はるかかなたのヨーロッパ本国からコンピュータネットワークを用いて遠隔で観測, 計測するシステムにも応用されている。そのほか大型高エネルギー加速器のための素粒子物理実験用大規模計測制御システムにも応用されている。しかし従来の分散オブジェクトモデルとして知られるRMIでは組み込みコンピュータを遠隔オブジェクトとして扱うことは困難であった。

その理由の一つは,RMI分散オブジェクトモデルが稼働条件にリソース(CPU処理能力, メモリー容量, 外部記憶装置等)を多く必要としている点にある。OS(オペレーティング・システム)が稼働していることも求められ, それに十分なリソースを用意することが不可欠である。さらにレジストリサーバ(リモートオブジェクト管理用仲介サーバ)を別途稼働させる必要もあるため, いっそう追加リソースも必要である。

一方, 組み込みコンピュータのリソースは一般的なコンピュータのそれよりも二桁以下であり, サーバと見立てることはできず, 上記稼働条件を満足できず,RMIオブジェクトも実装できない。ゆえに計測制御用組み込みコンピュータを分散オブジェクトモデル化することは困難であった。

RMIの改良, 高速化に関しても, 諸外国における研究では(i)通信速度(積算実行時間)は従来比で高々5%程度の改良にとどまっていた。(ii)別途, レジストリサーバは従来通り稼働させておくことが不可欠であり, その分だけシステム負荷が増大する問題もあった。(iii)原理的にコネクションオリエンテッドなTCP/IP通信を採用しているため, サーバ側あるいはネットワークに通信障害が発生すると, タイムアウトが発生するまでシステムが停止するという問題もあった。

過去数年のうちに組み込みコンピュータの計測制御装置への応用が拡大している。組み込みコンピュータはオーバヘッドが少ないため, 計測制御に有利である。組み込みコンピュータを被制御計測装置に内蔵または物理的に近接させ高速化および前処理機能強化を期待できる。

分散オブジェクトモデルを基礎として, 新たに組み込み分散オブジェクトモデルを開発して, 組み込みコンピュータをサーバとし, 分散オブジェクトとして抽象化できれば, そのハードウェア依存性を排除でき, 遠隔制御, 再構成および拡張が容易になる。オブジェクト化した組み込みコンピュータを無線LAN(Wireless Local Area Network, WLAN, WiFi)で相互接続すれば, 計測制御系を空間的に自由かつ機動的に配置できるので, さらに応用を広げられる。最上位クライアントは実行対象(装置等)に関して異機種間における非互換性などを関知することなく動作する。最下層サーバを交換, アルゴリズムを改良しても上位のクライアントは影響を受けない。

このような組み込み分散オブジェクトモデルの設計方法や所期の性能が得られるかどうか不明であった。組み込み分散オブジェクトモデルの主な性能評価として, トランザクションラップタイム, リソース消費を計測し, 障害検出機能等を評価し, その有効性を検証する

ことが必要であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、分散オブジェクトモデルを基礎として、組み込みコンピュータを遠隔分散オブジェクト化して、抽象化し、ネットワーク上において透過的にこれらを計測制御する手法を明らかにする。遠方に設置した組み込みコンピュータをオブジェクトとみなし、ネットワークで接続したクライアントがあたかもそのオブジェクトが自己のコンピュータの論理空間内に存在するかのように、リモートメソッドで実行できることになる。より規模が大きい上位ネットワークに統合できるという展望がある。これらのことから、組み込み分散オブジェクトモデルにより、組み込みコンピュータをIoT(Internet of Things)化する技術を確立することを試みる。

組み込み分散オブジェクトモデルは、もともと高エネルギー加速器の分散計測制御を目的として考えられてきたが、その応用分野の一つとして、実際に建設が計画されている三十億電子ボルト軟X線シンクロトロン放射光源及びアンジュレータやウイグラ挿入光源の放射光利用について、研究開発、計測、放射光実験装置への応用を調査検討する。

## 3. 研究の方法

RMIオブジェクトモデルにおけるクライアントの動作は原理的に通信をしつつ遠隔サーバと同期しており、リモートメソッドを起動するとサーバが計測制御を完了し、計測制御データを返答するまで ( $t_d$  sec) 実行中断する短所がある。センサやアクチュエータからなる制御系や計測系に対して、オブジェクトのシリアル化、デシリアル化、クライアントサーバ間の通信制御プロトコル、遠隔手続き実行アルゴリズムを検討する。ひとつの特長はサーバ側において、少リソースでも稼動条件を満たせる事である。本研究ではこの長所を採用して分散オブジェクトモデルを組込コンピュータ上で実現する。

組み込み分散オブジェクトモデルでは通信は非同期型で遅延が少なく、リソースも少なくすむため、負荷が軽い。組み込みコンピュータでオブジェクト・サーバ機能だけを実現できれば、クライアントからは組み込みコンピュータがあたかもJavaオブジェクトであるかのように機能する。これにより組み込みコンピュータを論理的なリモートオブジェクトとして分散モデル化でき、透過的に遠隔制御できると期待できる。性能評価として、トランザクションタイムとラップタイム、リソース消費を計測し、障害検出機能等を評価し、組み込み分散オブジェクトモデルの有効性を明らかにする。

実際にクライアント・サーバにおいて組み込み分散オブジェクトモデルのトランザクションタイムとラップタイム、リソース消費等を計測評価し、有効性を明らかにする。組み込みコンピュータに対する性能評価を実施し、アルゴリズムの妥当性、性能を示す。

まず組み込みコンピュータをオブジェクトモデルサーバ機として実装する。高性能コンピュータをオブジェクトモデルクライアントとする。ついで比較検討のため別の高性能コンピュータをRMIクライアント/サーバとして機能させる。各コンピュータは有線LANまたはWLANを切り替えて接続できるようにシステムを構成し、性能評価実験を行う。

将来へのシンクロトロン放射光源(三十億電子ボルト)を例とし、関連研究会に出席し、担当機関において調査、情報収集を行いシンクロトロン放射光源への応用を検討する。

#### 4. 研究成果

別途開発した高精度割り込み信号発生装置により、実験データを計測収集しつつ、アルゴリズムの開発、組み込みコンピュータのアーキテクチャおよびリソースの評価と実装を並行的に進展させた。WLANの通信制御処理の過程では、有線LANとは異なりWLANチップに対するチャンネル自動選択、ネゴシエーション手順と通信確立、そして暗号化処理等がリソース、プログラム領域を大きく圧迫するため、組み込み分散オブジェクトモデルの処理性能にも影響した。この部分はアーキテクチャおよび実装言語にも大きく依存するため、段階的に評価しつつ、実装した。実装言語によっては、不定期に強制起動する不要オブジェクト回収処理(ガーベッジコレクション)により全体の処理能力およびリソースが動的に変動するため、アプリケーションを除外したオーバーヘッドやリソースの消費量について時間的な動作性能を評価検討した。クライアントにおいてリモートオブジェクトはRMIのオブジェクトシリアル化生成規則に従って一旦シリアル化したオブジェクトに変換する。このとき、リモートメソッドに対応した一意のメソッド符号も生成する。メソッド符号、シリアル化オブジェクトとともに一つのパケットを生成する。このパケットはWLANの場合、セキュリティ上、一旦、暗号化してからサーバに送信する。

サーバがこのパケットを受信すると、暗号を解読したあと、メソッド符号に対応してリモートオブジェクトデータに従って、処理を実行する(処理時間を $t_d$ とする)。処理結果で得たオブジェクトは、再びシリアル化する。これをWLANの場合は、暗号化してから分散、既知のIPアドレスを有するクライアントに返答する。

組み込み分散オブジェクトモデルの性能計測比較では、クライアントからネットワーク上のサーバのリモートオブジェクトに対してリモートメソッドを実行した。サーバは、被制御装置(ダミーとしての高精度割り込み信号発生装置)に接続しておく。被制御装置における $t_d$ はセンサやアクチュエータの応答動作時間に起因する処理時間とみなせる。被制御装置はサーバより実行開始トリガ信号を受けると、直ちに確認信号をサーバに返答する。その後、計測では処理時間 $t_d$ 後に処理完了信号をサーバに発出する。サーバはこの信号を検出すると、クライアントに対し、実行完了結果をオブジェクトデータとしてクライアントに返信する。

組み込み分散オブジェクトモデルとRMIのクライアントとして、3.1GHz, 4 Core, Linux kernel 5.4(64Bit), RMIサーバとして同仕様のPCを用いた。メモリ量は32GBとし、Javaのラインタイム時におけるガーベッジコレクションによる遅延を防止可能なほど十分大である。

WLANにおいて組み込み分散オブジェクトモデルのクライアント側は100Mbpsであるが、サーバ側では前記機能を満たすハードウェアの仕様は54Mbpsである。RMIのクライアント、サーバは100Mbpsで接続した。RMIのWLANではクライアント、サーバはいずれも100Mbpsで接続した。これを比較対象となるRMIリモートオブジェクトについても、全く同じオブジェクトを生成し、クライアントサーバ間で、送受信に要する実行時間を計測した。クライアントから100ms毎にこれを $10^3$ 回実行し、サーバ側で $t_d=20\text{ ms}\sim 40\text{ ms}$ とした場合について、積算実行時間 $T_E$ を計測した。オーバーヘッドや通信制御時間を無視した理論限界時間は $t_0 = 100\text{ ms} \times 10^3 = 100\text{ s}$ である。組み込み分散オブジェクトモデルでは $T_E$ が $(t_0 + 0.16)\sim(t_0 + 0.21)\text{ s}$ で応答しており、 $t_d$ 値によらずほぼ一定であり、 $T_E = (-0.0025t_d +$

100.26)sを得た。一方、RMIでは $T_E$ は $(t_0 + 20.28)s \sim (t_0 + 35.55)s$ であり、 $t_d$ 値に比例しており、 $T_E = (0.764t_d + 105.0)s$ を得た。RMIの実行時間は組み込み分散オブジェクトモデルのそれと比較すると、 $t_d=40$  msのとき、35.4 sも遅れており、組み込み分散オブジェクトモデルが高速であることが示された。

組み込み分散オブジェクトモデルでは通信は非同期型で遅延が少なく、リソースも少なくすむため、負荷が軽いと見込められる。クライアントからは組み込みコンピュータが論理的なりモートオブジェクトとして分散モデル化でき、透過的に遠隔制御できることが期待される。RMIと同じオブジェクトに対し、リモートメソッドを実行できる上に、レジストリサーバも不要となった。

開発と並行して「次世代放射光施設シンポジウム(仙台)」出席、さらに放射光利用側の推進主体の東北大学理学部にて関係者とも情報交換をした。周回電子の加速エネルギーが三十億電子ボルトの軟X線放射光電子蓄積リング(放射光源)からは、数十電子ボルトから1キロ電子ボルトに及ぶ光子エネルギーを持つ、「SP-8 (BL-25SU)」よりも100倍強力で熱負荷も大きい軟X線が発生する。蓄積リングの周長は349 mでPFの187 mの2倍弱である。電子蓄積リングは基本セル数16ヶ、蓄積電流400 mA、エミッタンス $1.1\text{nm} \cdot \text{rad}$ でSPring-8の2.4 nmradより低エミッタンスかつ高輝度である。長直線部(5.44m長)16ヶ所は、主に軟X線・真空紫外線発生用アンジュレータに、短直線部(1.64m長)16ヶ所は、テングーX線発生用アンジュレータに用いる。発生できる放射光の輝度と光子束(フラックス)の数値は、軟X線域(0.1~1 keV)、テングーX線域(1~10keV)で、新知見が多数得られると期待できる。このような放射光源、アンジュレータ、ウイグラ等の挿入光源の放射光研究分野について、高速計測制御機能が求められており、本研究はこのような放射光源にも展開を期待できると考えられる。本研究の組み込み分散オブジェクトモデルシステムは、まさにコンピュータネットワーク特にWLANを介して、高速でデータ収集および制御を可能とするための研究分野である。

本研究によりクライアント・サーバ間においてWLAN機能を有する組み込みコンピュータを拡張しIOT化する手段に関する知見が得られた。これにより計測制御およびモニタリングシステムだけでなく、センサネットワークを容易にインターネット等の上位ネットワークに統合できる。気象観測、農業耕作管理、火山地震観測網、河川洪水観測リアルタイムモニタ、地震津波広域沿岸観測モニタ、放射線モニタなどを目的とするセンサネットワークなどを容易にインターネット等の上位ネットワークに接続できるため、その効果と応用範囲を拡張できる。これまで得た成果は米国学術誌(レフェリー付き)IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, U.S.A.にて掲載された。さらに総合科学研究機構における研究発表会で発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Noriichi Kanaya, Shigeru Sato, Shuhei Ootani, and Hidenori Takahashi	4. 巻 72
2. 論文標題 Masquerading a Networked Embedded Computer as a Remote Object Using an Asynchronous Remote Object Protocol for a System With Small Servers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIM.2023.3265764	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

(1)「高輝度3 GeV放射光計画調査報告」総合科学研究機構 <a href="https://www.cross.or.jp/">https://www.cross.or.jp/</a> (2)2021年2月25日,総合科学研究機構,総合科学研究センター第2回研究会発表「ワイヤレスネットワーク上に配置した組み込みコンピュータの分散オブジェクトモデル化とその展望」 (3)2024年2月20日,総合科学研究機構,総合科学研究センター第1回研究会発表「Masquerading a Networked Embedded Computer as a Remote Object Using an Asynchronous Remote Object Protocol for a System With Small Server」
---

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	佐藤 繁  (Sato Shigeru)  (10005796)	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・主任研究員）  (82121)	

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