

# BMI 応用サービスの実現に向けた エージェントベース分散処理基盤の提案と評価

竹内 亨<sup>1,a)</sup> 坂野 遼平<sup>1</sup> 馬越 健治<sup>1</sup> 川野 哲生<sup>1</sup>  
神林 隆<sup>1</sup> 武本 充治<sup>1</sup> 松尾 真人<sup>1</sup> 柿沼 隆馬<sup>1</sup>

**概要:** 脳活動に基づいて機器の操作を可能にする BMI (Brain Machine Interface) 技術を実環境に適用することを旨としたネットワーク型 BMI プロジェクトにおいて、BMI 応用サービスを容易に提供可能なサービス基盤が必要である。そこで、エージェントの連携によってシステムを表現することで、状況に応じて適応的な振る舞いが可能なエージェントベース分散処理基盤を提案する。一般に、エージェントベースで構成されたシステムは、垂直統合で構成されたシステムに対して遅延が大きいため、実時間性がある BMI 応用サービスに適用できるのかが明らかでない。そこで、P2P エージェント基盤 PIAX 上に実証システムを構築し、実環境を想定したシミュレーションを行った。その結果、分散処理基盤上での遅延時間をおおむね 50ms 以下に抑えられていることが分かり、実現可能であることを明らかにした。

**キーワード:** 分散エージェント, ネットワーク型 BMI, ストリーム処理, PIAX

## Proposal and Evaluation of Agent-based Service Platform towards BMI-enabled Service

SUSUMU TAKEUCHI<sup>1,a)</sup> RYOHEI BANNO<sup>1</sup> KENJI UMAKOSHI<sup>1</sup> TETSUO KAWANO<sup>1</sup>  
TAKASHI KAMBAYASHI<sup>1</sup> MICHIHARU TAKEMOTO<sup>1</sup> MASATO MATSUO<sup>1</sup> RYUMA KAKINUMA<sup>1</sup>

**Abstract:** Network BMI Project has been performed to apply BMI (Brain Machine Interface) technology, which enables to control a device by brain activity, to the actual living environment. In this project, a service platform is required to realize BMI-enabled services. Thus, the agent-based service platform that represents a service as a series of agents is proposed. However, the transmission latency is generally larger than that of integrated systems, so feasibility in the real environment should be evaluated while BMI-enabled services should be provided in real-time. In this paper, P2P agent platform PIAX is utilized to develop an experimental system, and a simulation is performed in an environment modeling the real world. As a result, the simulation result shows that almost of the latency is less than 50ms, so the practical BMI-enabled service would be realized on the Agent-based Service Platform.

**Keywords:** Distributed Agent, Network BMI, Stream Processing, PIAX

### 1. はじめに

脳活動に基づいて機器の操作を可能にする BMI (Brain Machine Interface) 技術を実際の生活環境に適用すること

を旨とした、ネットワーク型 BMI プロジェクトを進めている [1]。本プロジェクトでは、実用的な脳情報解読を行うため、ネットワーク上のデータベースに多数かつ長時間のユーザの脳活動情報などを集積し、データ駆動型の脳活動解読処理を行うことによって、ユーザの意図を判別することを想定している。また、その判別結果を用いて実環境の多様な機器を連携することを目指しており、ユーザ数や

<sup>1</sup> 日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所  
NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation  
<sup>a)</sup> takeuchi.susumu@lab.ntt.co.jp

データ量への拡張性、および、機器の異種性への対応など、様々な要求に応えつつ、BMI を応用したサービスを提供する必要がある。このようなサービスを個別に構築・提供することは非常に困難であることから、様々なサービスを容易に構築可能な拡張性・柔軟性のあるサービス基盤が求められる。

そこで、分散エージェント技術に着目し、適応的なエージェント配置によって柔軟性・拡張性を確保しつつ、ルールベースによる多様なサービス実現を目指したエージェントベース分散処理基盤を提案する。本基盤では、サービスを構成する実空間の機器・ユーザ・場や、仮想空間上の処理・データベースなどの各種要素をエージェントとして抽象化し、一連のエージェントの連携としてサービスを表現する。これによって、実環境の多様性・異種性を隠蔽し、かつ、エージェントを状況に応じて複製・再配置することで、動的な環境の変化や負荷の増減に対して柔軟に対応可能と期待される。

しかし、BMI 応用サービスのように実環境で提供する多くのサービスには実時間性に対する要求があるが、垂直統合で構築されたシステムに対してエージェントベースで構築されたシステムは遅延が大きいと考えられるため、実環境での実用性を検証する必要がある。そこで本研究では、エージェントベース分散処理基盤に基づいて BMI 応用サービスを実現するアーキテクチャを設計・実装し、実環境を想定したシミュレーションによって、実現可能性を評価する。

本稿では、ネットワーク型 BMI プロジェクトの概要、および、BMI 応用サービスを実現する上でのサービス基盤への機能要件を 2 章で述べる。次に、3 章にて提案するエージェントベース分散処理基盤について述べ、BMI 応用サービスに適用した際のエージェントモデルについて 4 章で述べる。最後に、実証システムに基づいて実現可能性の評価結果および考察を 5 章で述べる。

## 2. ネットワーク型 BMI におけるサービス基盤への要求

### 2.1 ネットワーク型 BMI プロジェクト

脳と機器のマンマシンインタフェースを提供することを目指した BMI 技術は、これまで、fMRI \*1 や MEG \*2 など大規模な脳活動計測器を用いて、脳の特定の部位がどのような機能を持っているのかを実験室レベルで明らかとしてきた。また、その知見に基づいてユーザの脳活動データから意図を判別（脳情報解読）することで、遠隔の機器を駆動可能であることを示した [2]。

このような BMI 技術を自宅や診療所など、一般的な生活

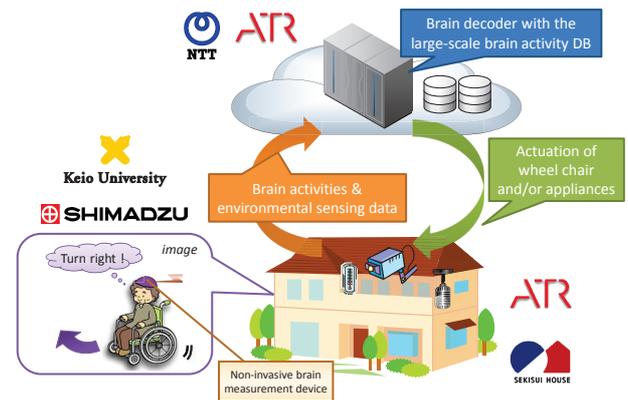


図 1 ネットワーク型 BMI プロジェクトの概要

Fig. 1 Overview of Network BMI Project

環境（実環境）に適用するためには、(i) 大規模な fMRI や MEG ではなく、より可搬性の高い NIRS \*3 や EEG \*4 を利用し、(ii) 微弱な脳活動信号に対する実環境の様々な機器や人体そのものからのノイズ（アーチファクト）を考慮する必要がある。一方で、脳情報解読の観点からは、(iii) 環境を限定できない実環境においては、実験室レベルの知見がそのまま適用できず、状況によって変化するため、画一的なモデルに依存しない柔軟な解読処理を実現する必要がある。さらに、(iv) ユーザによって脳活動のパターンは異なり、かつ、ユーザの意図や操作したい対象などによって最適な脳情報解読手法が異なるため、動的に解読処理を変更する必要がある。

そこで、NTT らは、BMI 技術を実環境に適用し、車椅子や住設機器・家電など、様々な機器を操作可能とすることを目指したネットワーク型 BMI プロジェクトを進めている（図 1）。本プロジェクトでは、NIRS や EEG の小型化を進めることで (i) の課題の解決を図り、ネットワーク上のデータベースに多数かつ長時間のユーザの脳活動データおよび実環境センサデータなどを集積することで、データ駆動型の脳情報解読処理を実現し、他の課題の解決を図って機器操作を可能とする。具体的には、過去の脳活動データとそのデータを計測した際のユーザの意図を元に脳情報解読処理を行うことで (iii) の課題を解決し、アーチファクトを含む周囲の多様な状況やその動的な変化も一連の解読処理の対象とすることで、(ii) の課題を解決する。さらに、ユーザや処理対象などに応じて柔軟に解読手法を切り替えることで、(iv) の課題を解決し、実環境における脳情報解読を実現する。

### 2.2 BMI 応用サービスへの要求と基盤の必要性

BMI を実環境に適用するためには、2.1 節で述べたように、各種機器や処理・データベースをネットワーク上で連携し、状況に応じた柔軟なユーザの脳情報解読を実現する

\*1 functional magnetic resonance imaging、MRI を用いた脳血流測定

\*2 Magnetoencephalography、脳磁図

\*3 Near-infrared spectroscopy、近赤外光による脳血流測定

\*4 Electroencephalography、脳波計

必要がある。また、BMI 応用サービスを実際に展開するためには、ユーザ数やデータ量など数的な規模への拡張性を備えるとともに、センサや家電など機器の多様化、BMI 応用サービスの多様化など質的な規模への拡張性も備える必要がある。一方で、脳活動データは一種の個人情報であり、そのデータの取得・保管・処理においては、ユーザ毎に異なるポリシーを考慮する必要がある。

BMI 技術は実環境における多様なサービスに適用でき、また、それらサービス同士の連携によって有用性を向上させることが重要であると考えられるが、以上の要求を同時に満たしつつ、個別に構築・提供することは非常に困難である。したがって、サービスを容易に構築可能なサービス基盤が必要である。

### 2.3 サービス基盤の機能要件

BMI 応用サービスにおいては、センサやアクチュエータなどの機器、脳情報解読処理や既存サービスなどの様々な処理、および、各種データベースなど、サービスに関わる多様な要素を連携する必要がある。そのようなサービスを容易に構築可能な基盤においては、2.2 節で述べた要求に基づいて、以下のような機能要件を満たす必要がある。

**要件 1 (要素の多様性・異種性の隠蔽)** 機器や処理、データベースなど各種要素の多様性・異種性を隠蔽し、サービス提供者やユーザが容易に認識できる。

**要件 2 (要素の動的な連携)** 要素が状況に応じて動的に連携することでサービスを実現し、かつ、サービス提供者やユーザが容易にサービスを設計・変更できる。

**要件 3 (要素の数的・質的な拡張性)** ユーザ数の増加など数的規模の拡大、および、機器や処理の多様性など質的な規模の拡大に対して、サービス提供者やユーザの要求に応じつつスケールできる。

**要件 4 (要素の連携における見読性)** ユーザのデータの取得・保管、および、ネットワーク上での処理が、指定したポリシーに従っているのかを確認できるよう、サービス提供者やユーザが透過的に把握できる。

## 3. エージェントベース分散処理基盤

### 3.1 概要

実環境におけるセンサやアクチュエータなどの機器を操作し実空間に作用を及ぼすサービス（以下、実空間サービス）を提供可能な基盤として、Smart Shadow [3] の研究開発を進めてきた。Smart Shadow は、実空間内の要素をエージェントとして抽象化し、USDL [4] によって記述することで、多様な実空間サービスを表現可能とした。また、複数のユーザやサービスが同一空間内で併存した際の資源および環境競合を検出可能な枠組みを提案した。

本研究では、Smart Shadow を拡張し、ネットワーク上の処理やデータベースなど異種な要素と動的な連携が可能

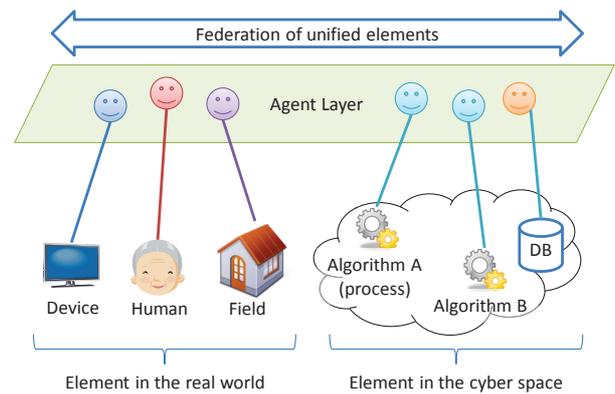


図 2 要素の抽象化とエージェントの連携

Fig. 2 Abstraction of Elements and Federation as Agents

なサービス基盤として、エージェントによってシステム全体を疎結合で表現するエージェントベース分散処理基盤を提案する。

### 3.2 エージェントベース分散処理基盤の定義と特徴

#### 3.2.1 要素のエージェント化

エージェントベース分散処理基盤では、図 2 のように、Smart Shadow において抽象化した実空間内の機器（デバイス）・ユーザ（人）・場（フィールド）といった要素だけでなく、仮想空間内に存在する一定の不可分な処理やデータベースなどの概念も要素として統一的に抽象化し、エージェントとして表現する。

これにより、特定のサービスに関わる実空間および仮想空間内に遍在するそれぞれの要素を等価的に扱えるようになるため、要素の多様性・異種性を隠蔽して表現できる。

#### 3.2.2 エージェントの連携によるサービス

サービスは、複数のエージェントを一連のフローとして構成し、それらの連携として表現する。

これにより、サービス提供者やユーザがサービスの全体像やデータ・処理の流れなどをエージェント単位で容易に把握できるようになるため、サービスの構築や改変が容易になると期待される。また、ユーザ数やデータ量の増大、負荷の高い処理フローを実現する際にも、適宜エージェントを定義・複製し、異なる計算機に分散して配置して連携することで、量的な拡張性を実現できる。さらに、機器や処理の多様性についても、サービスを構成する一部のエージェントを動的に切り替えることで、質的な拡張性を確保できる。

### 3.3 エージェントベース分散処理基盤の機能

#### 3.3.1 基盤への要求

実空間サービスにはユビキタス性があり、かつ、ネットワーク上の処理やデータベースと連携して提供される必要があるため、サービスを構成するエージェントはネットワーク上に適切に分散していることが望ましい。また、

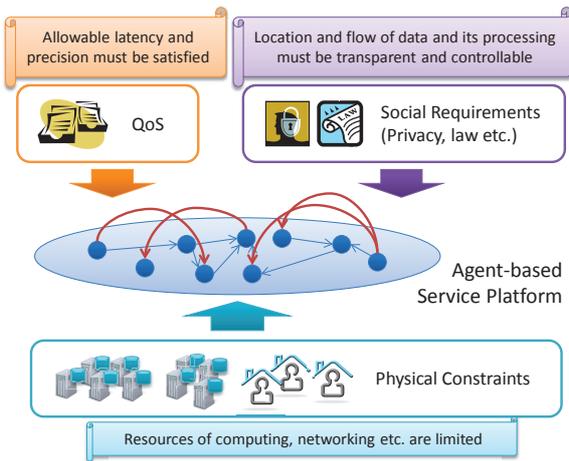


図 3 エージェントベース分散処理基盤への要求

Fig. 3 Requirements for Agent-based Service Platform

ユーザの情報を利用して実空間に作用を及ぼすことから、社会的に受容されるようサービスを提供する必要がある。

すなわち、エージェントベース分散処理基盤は、図 3 に示す以下の要求をすべて充足しつつ、多様性・異種性に対応した動的な基盤として実現する必要がある。

(a) 物理的な制約の隠蔽

動的なエージェント連携を実現するため、計算機やネットワークなどの性能・容量およびその利用率など、物理的な資源の多様性・動的性を隠蔽する。

(b) サービス品質の要求

物理的な制約の下で、各サービスが求める遅延や処理の精度などの品質を満たす。

(c) ユーザおよび社会的な要求

物理的な制約の下で、ユーザや社会的なポリシーに応じてデータが透過的に取得・保管、および、流通され、ネットワーク上の処理と連携する。

3.3.2 エージェントの適応的配置とルールによる連携

3.3.1 節で述べた要求を満たすため、エージェントベース分散処理基盤においては、以下のような機能を提供する。

エージェントの適応的配置

物理的な制約の下でサービス品質やユーザ・社会的な要求に対応するには、計算機やネットワークの性能・容量や利用率など、動的な状況に応じてエージェントを複製し、ネットワーク上で再配置することで、より適応的なエージェント構成とする必要がある。

そのため、物理的に異種なネットワークを含むネットワークトポロジ上でエージェントを構成・発見・連携でき、かつ、要求に応じて容易に複製を作成・移動可能とする。

ルールによるエージェントの連携

エージェントは、多様な機器やユーザ、あるいは他のサービスと自律的かつ柔軟に連携してサービスを提供する必要があるため、疎結合による連携が必要であり、独立性の高いサービス記述が求められる。

そのため、手続き的な記述ではなく、状況に依存してサービスが実行できるルールベースの記述手法および処理機構を提供する。

3.4 関連研究

エージェントベース分散処理基盤においては、サービスを一連のエージェントとして表現することで、各エージェントを適応的に複製および再配置し、実時間性のあるサービスを提供可能な基盤の実現を目指している。

実空間をエージェントによって抽象化している事例として、文献 [5] が挙げられる。屋内空間におけるコンテキスト情報を活用したユビキタスサービスを想定したエージェントベースのミドルウェアを提案しており、ユーザや機器、ユビキタスサービスにそれぞれエージェントを割り当てることで、要素やサービスの統一的な取り扱いを可能としている。また、ミドルウェアの実用として、会議等において参加者に情報提示を行うアプリケーション「Memory Jog」を実装している。

処理の分散化を指向したエージェントの活用事例として、文献 [6] がある。広域環境モニタリングのサービス構築を容易にするミドルウェアを提唱しており、通信や処理の詳細をサービスアプリケーションから隠蔽することで、センサーアプリケーションの開発効率向上を狙っている。ミドルウェア上でのデータ処理については、タスクフォースと呼ばれる複数エージェントからなるグループに適宜割り当てられ、処理の分散化を実現している。また、過負荷なエージェントが存在した場合は、タスクを適宜分割し、他のエージェントに分配する機構を有することで、拡張性を実現している。

一方で、分散エージェントのモビリティを活用した研究として、MobiDoc [7] がある。MobiDoc は複合ドキュメントのフレームワークであり、ドキュメントを構成するコンポーネントが、コンテンツに加えてそのコンテンツを表示・編集できるプログラムも内包するという自己完備性を持たせている。コンポーネントがモビリティを備えることで、自律的なドキュメント配信や、表示・編集の継続性を実現している。

4. BMI 応用サービスのエージェントモデル

4.1 エージェントベース分散処理基盤の適用

4.1.1 サービス基盤への要求の実現

エージェントベース分散処理基盤においては、3.2.1 節で述べた要素の抽象化によって、要素の多様性・異種性の隠蔽 (2.3 節の要件 1、以下同様) が実現され、3.2.2 節で述べたエージェントの連携によって要素の動的な連携 (要件 2) や数的・質的な拡張性 (要件 3) が実現される。さらに、抽象化されたエージェント単位でデータが取り扱われるため、サービス提供者やユーザから処理フローの把握

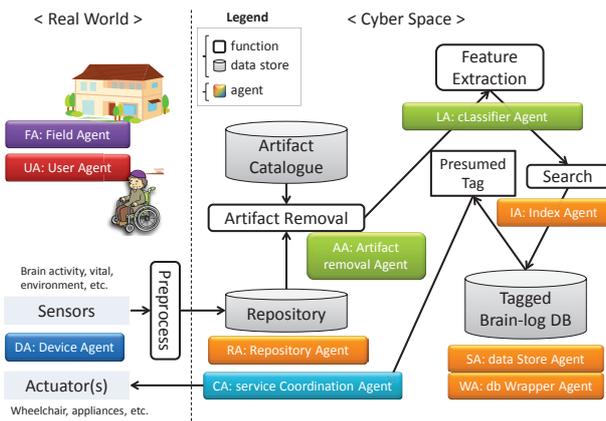


図 4 想定処理フローとエージェントの構成

Fig. 4 Presumed Processing Flow and Composition of Agents

が容易であり、要素の連携における見読性（要件 4）も実現できる。

そこで本研究では、BMI 応用サービスを実現するためのサービス基盤として、エージェントベース分散処理基盤を用いることとした。

#### 4.1.2 想定処理フローによるエージェントの構成

ネットワーク型 BMI プロジェクトでは、脳活動データからユーザの意図を判別し、実空間の車椅子や住設機器を駆動させる一連のフローを、図 4 内の機能およびデータベースの連携として想定している。具体的には、ユーザの脳活動データを取得した後、前処理を行ってリポジトリに蓄積する。次に、状況に応じてアーチファクトを除去し、特徴量抽出を行う。さらに、過去の脳活動データの特徴量とその際の意図（タグ）の対応表（タグ付きブレインログ）を検索し、結果を推定タグとして取得して現在のユーザの意図を判別する。最後に、判別結果に基づいて実空間のアクチュエータを駆動する。

エージェントベース分散処理基盤ではサービスを一連のエージェントとして構成する必要があるため、上記想定処理フローに基づいて、図 4 内のエージェントを定義した。

## 4.2 エージェントモデルの構成

エージェントは、実空間の要素を抽象化したエージェントと、仮想空間上の処理やデータベースなどの要素を抽象化したエージェントに分類でき、それぞれの役割と動作について以下で述べる。

### 4.2.1 実空間のエージェント

実空間に存在する要素を抽象化したエージェントは、文献 [3] を元以下のように構成した。

#### ユーザエージェント (UA)

特定のユーザを抽象化し、自身の脳活動データを DA から取得する。取得した脳活動データに前処理を加えた後、ユーザの設定したポリシーに従って RA に送出し、脳情報解読処理を依頼する。また、BMI 応用サービスでは、脳

活動データから判別した結果と実空間の機器の動作を関連づける必要があるが、ユーザによって所望の動作は異なると考えられる。この一連の対応関係をサービスルールと呼び、各 UA が保持し、事前に FA に対して登録依頼を行うことで、一連のサービスを実現する。

#### デバイスエージェント (DA)

特定の機器または機器群を抽象化し、センシングデータやステータスなど機器の状態を管理する。また、他のエージェントからの要求に応じて、それらのデータの送付や、管理下にある機器の駆動を行う。

#### フィールドエージェント (FA)

部屋などの特定の実空間領域（場）を抽象化し、同空間内に存在する UA、DA を管理する。環境センサは空間に設置されるため、FA が DA から実環境センサデータを取得し、RA に送付する。また、サービスルールの登録依頼が UA から行われた場合、自身の配下にある DA と対応付けた後、CA に対してサービスルールの登録依頼を送付する。脳情報解読の結果、CA から機器の駆動要求を受け取った際は、文献 [3] で提案した競合を検出し、適切な DA に対して駆動要求を行う。

### 4.2.2 仮想空間のエージェント

BMI 応用サービスにおける脳情報解読処理やデータベースを抽象化した仮想空間のエージェントは、4.1.2 節で述べたフローに基づき、以下のように構成した。

#### リポジトリエージェント (RA)

実環境のデータと仮想空間における処理やデータベースとの接続機能を抽象化し、サービス上でのデータの取り扱いを管理する。FA から実環境センサデータを受け取った際には SA に送付して蓄積し、UA から脳活動データを受け取った際には LA に送付することで脳情報解読処理を依頼する。

#### 判別エージェント (LA)

脳情報解読処理の中核となる判別器を抽象化し、脳活動データからユーザの意図を判別する。事前に CA からサービスルールの登録を受け付け、判別結果と機器の駆動を対応付ける。次に、RA から脳活動データを継続的に受け取り、AA にアーチファクトの除去を依頼した後、特徴量を算出して IA に検索を依頼する。最後に、その結果得られた推定タグに該当するサービスルールが存在した場合、CA に通知する。

#### アーチファクト除去エージェント (AA)

状況に応じたアーチファクト除去機能を抽象化し、脳活動データを LA から受け取って、除去結果を返す。

#### インデックスエージェント (IA)

脳情報解読処理の検索機能を抽象化し、索引構造を保持する。LA から受け取った脳活動データの特徴量に基づいて索引を検索し、その結果に基づいてタグを SA から取得する。得られたタグは、LA に送付する。

## データストア (SA) およびラッパーエージェント (WA)

データストアの種別やノードを抽象化し、SA は WA の管理、WA はデータベースの管理を行う。WA はリレーショナル型データベースや key-value 型データストアなど、各種データベースを一つ接続することが可能とし、SA において複数の WA を管理することで、異なるデータストアを抽象化する。

## サービス連携エージェント (CA)

BMI 応用サービスにおけるエージェント連携機能を抽象化し、脳活動データに基づいてユーザが機器制御を行うためのサービスを仲介する。事前に FA から受け取ったサービスルールは、自身のリストに登録するとともに LA に送出し、脳情報解読結果と機器の駆動の対応付けを依頼する。LA からトリガに該当する脳情報解読結果が得られたことを通知された際には、その結果を依頼元の FA に通知する。

## 5. エージェントベース分散処理基盤を用いた BMI 応用サービスの実現可能性の評価

### 5.1 評価の目的と概要

状況が動的に変化する環境において、エージェントベース分散処理基盤上で BMI 応用サービスのようなサービスを構成するためには、3.3 節で述べた機能要件を実現する必要がある。しかし、そもそもエージェントベースで構築されたシステムは、垂直統合で構築されたシステムに対して遅延が大きくなると考えられるため、実環境での実用性を検証する必要がある。

そこで、実環境を想定したシミュレーション環境を構築し、脳活動データの計測から機器駆動までの一連の処理に相当する遅延時間を評価した。

以下では、ネットワーク型 BMI プロジェクトで対象とする環境を想定した実証システムとシミュレーション環境、および、遅延時間に対する評価結果を述べる。

### 5.2 実証システムと評価環境

#### 5.2.1 実証システムの概要

4.2 節で述べたエージェントモデルに基づいて、P2P エージェント基盤 PIAX [8] 上に図 5 に示す実証システムを構築した。

本システムは、エージェントおよび付随する機能は Java で実装した。脳活動データについては、脳活動計測器用の DA に疑似データ生成機構を設け、EEG を 256Hz、24 チャネルで計測した際と同等のデータ量\*5を送出できるようにした。また、脳情報解読処理の一部については、MATLAB で実装された処理と LA における処理を連携可能とし、IA における索引構造としては M-Index [9] を採用した。WA 配下のデータストアとしては、PostgreSQL を配置した。

\*5 30ms おきに 1480byte のデータを生成

表 1 評価環境

Table 1 Experimental Environment

区分	項目	詳細
物理サーバ (2台)	CPU	Intel Xeon X5677 ×2
	RAM	32GB
	HDD	3TB (250GB×12)
	Hypervisor	VMware ESX 4.1.0
	Network	1000BASE-T
実空間側の 仮想マシン	CPU	512MHz (相当)
	RAM	512MB
	OS	CentOS 6.0
	Network	50Mbps
仮想空間側の 全仮想マシン	CPU	unlimited
	RAM	2GB
	OS	CentOS 6.0
	Network	unlimited

表 2 仮想マシンの配置

Table 2 Deployment of Virtual Machines

物理サーバ	仮想マシン	エージェント等 ({} はピア)
1 台目	実空間	{UA, DA×2, FA}
	仮想空間 2	{LA}, MATLAB 処理系
	仮想空間 4	{SA}, {WA}, PostgreSQL
2 台目	仮想空間 1	{RA}
	仮想空間 3	{AA}, {IA}
	仮想空間 5	{CA}

一方で、UA や FA、CA において利用されるサービスルールについては、3.3.2 節で述べたように状況に応じて柔軟に連携できるルールベースでの記述が望ましい。そこで、アクティブデータベースなどで用いられる ECA ルール [10] によって表記できるようにし、CA にルール解釈エンジンを実装した。また、AA については、アーチファクト除去法が未定のため、現段階では特段の処理をしないものとした。

#### 5.2.2 シミュレーション環境

実環境を想定したシミュレーション環境を構築するため、次のような環境に実証システムを展開した。

まず、各エージェントは、図 5 に示すように PIAX ピア上に配置し、各ピアを異なる仮想マシンに配置した。次に、各仮想マシンは、エージェントが他のエージェントと通信する際に物理的なネットワークを介するよう、表 1 に示す物理サーバ 2 台に対して、表 2 のように互い違いに配置した。

なお、実空間のエージェントは一般家庭に配置することを想定しているため、一つのピアに全エージェントを配置し、表 1 のように仮想マシンの計算機性能を制約した。また、実空間側の仮想マシンと仮想空間側の仮想マシンの間のネットワーク帯域は、家庭用の光回線を想定した 50Mbps に制約した。

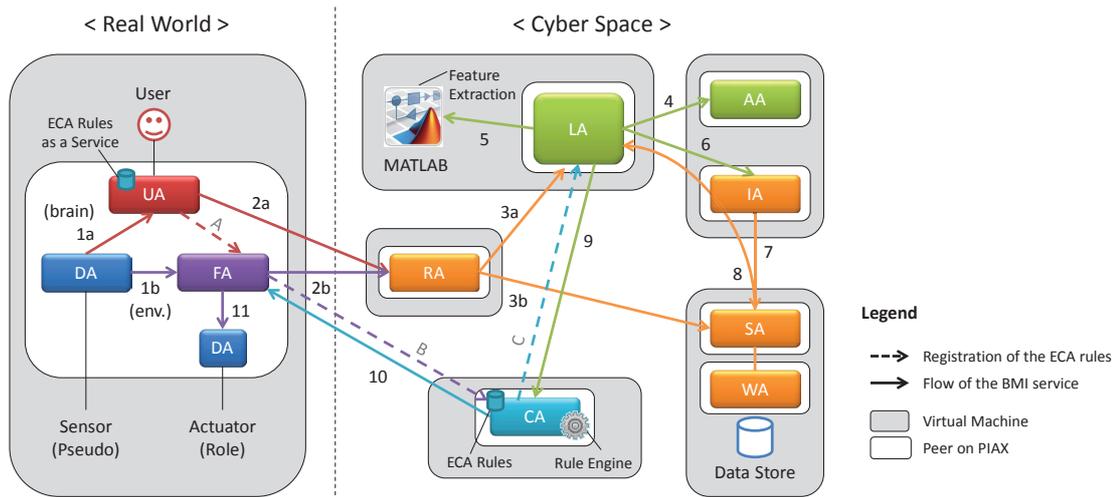


図 5 実証システムのエージェント構成

Fig. 5 Composition of Agents in the Experimental System

表 3 シミュレーション条件  
Table 3 Conditions of Simulation

エージェント	項目	詳細
UA	ECA ルール数	100 *6
	初期データ数	10
IA (M-Index)	kNN	5
	Pivot 数	5
	クラス最大レベル数	2
	クラス最大要素数	3

エージェント上で実現するサービスの規模として、現在ネットワーク型 BMI プロジェクトで想定している脳活動データの蓄積量や、提供すべきサービスの複雑さに基づいて、表 3 のように設定した。

### 5.3 遅延時間の評価と考察

脳活動計測器を抽象化した DA において疑似データを生成してから、一連の脳情報解読処理を実行し、アクチュエータを抽象化した DA に指令が伝わるまでの遅延時間を、5.2.2 節で構築した環境上で約 5 分間計測した。処理系や OS 等の影響を避けるため、安定した結果が得られた最後の約 2 分間の測定結果を抽出した。得られた遅延時間の分布を、箱ひげ図を用いて図 6 に示す。

図より、おおむね 50ms 以内 (平均約 33ms) で一連の処理が実現できていることがわかる。この遅延時間は、ユーザが意図してから脳活動データに反応が表れる時間\*7に対して十分に短く、エージェントベース分散処理基盤に基づいた BMI 応用サービスは、実環境においても十分に実用的であるといえる。

\*6 シミュレーション実行前に FA を経由して CA に登録し、脳活動データを送出する度に 100 件中いずれか 1 件のルールに必ず合致するように設定した。

\*7 外部刺激に対する反応であっても、数百 ms 要する。

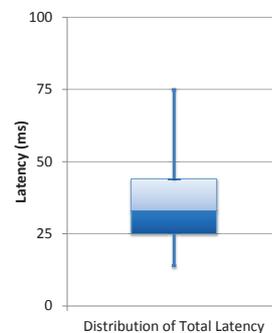


図 6 全体の遅延時間

Fig. 6 Total Delay Time

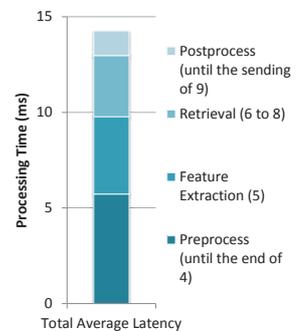


図 7 LA 内の遅延時間

Fig. 7 Delay Time in LA

一方で、通信時間を除いてもっとも処理に時間を要する LA における遅延時間の平均を積算した結果を図 7 に示す。なお、図中の凡例に示した数値は、図 5 における LA が関わるフロー番号を示している。図 7 より、LA 内の処理や、他のエージェントおよび処理系に処理を依頼する段階において、異なった処理時間がかかっていることが分かる。

一般に、垂直統合で構築されたシステムにおいては、このような処理毎に異なる所要時間を前提に拡張性を担保することは困難であり、全体の処理時間にあわせて並列化等の高速化手段を導入する必要がある。しかし、エージェントベース分散処理基盤においては、もともと一定の機器や処理などの要素単位でエージェントが構成されているため、適宜エージェント毎に複製・冗長化することで、実時間性を確保しつつ、より柔軟な拡張性を実現できる。

## 6. まとめ

本稿では、BMI 技術を応用したサービスを容易に提供可能とするため、エージェントの連携によってシステムを表現するエージェントベース分散処理基盤を提案した。本基盤に基づいて実証システムを構築し、ネットワーク型 BMI

プロジェクトにおいて実際に想定される環境を再現してシミュレーション評価を行った。その結果より、本基盤に基づいた BMI 応用サービスは、十分に実用的であることが明らかとなった。

今後の課題として、実ユーザによって脳活動データをリアルタイムに計測しつつ、住設機器や車椅子を連携した評価を行うことが必要である。また、他のサービスと容易に連携可能とするため、エージェントモデルを汎用化することが必要である。さらに、エージェントの適応的配置の課題に取り組み、人や機器、ルール等に対する拡張性を確保する必要があると考えられる。

**謝辞** 本研究の一部は、平成 23、24 年度総務省委託研究「脳の仕組みを活かしたイノベーション創成型研究開発」による成果である。

### 参考文献

- [1] NTT ニュースリリース：ネットワーク型ブレイン・マシン・インタフェース (BMI) の一般生活環境への適用可能性を確認. <http://www.ntt.co.jp/news2012/1211/121101a.html>.
- [2] 岡部達哉, 山田健太郎, 木村真弘, 戸田明祐, 佐藤雅昭, 山下宙人, 武田祐輔, 川人光男: 考えるだけで機械を操作する BMI 技術, *Honda R&D technical review*, Vol. 22, No. 2, pp. 91-98 (2010).
- [3] Umakoshi, K., Kambayashi, T., Yoshida, M., Takemoto, M. and Matsuo, M.: S<sup>3</sup>: Smart Shadow System for Real World Service and Its Evaluation with Users, *Proc. of the 11th IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2011)*, pp. 394-401 (2011).
- [4] Ubiquitous Networking Forum: Universal Service Description Language (2010). <http://www.ubiquitousforum.jp/documents/usdl/down-e.html>.
- [5] Soldatos, J., Pandis, I., Stamatis, K., Polymenakos, L. and Crowley, J. L.: Agent Based Middleware Infrastructure for Autonomous Context-aware Ubiquitous Computing Services, *Computer Communications*, Vol. 30, No. 3, pp. 577-591 (2007).
- [6] Dauwe, S., Renterghem, T. V., Botteldooren, D. and Dhoedt, B.: Multiagent-Based Data Fusion in Environmental Monitoring Networks, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 2012, pp. 1-15 (2012).
- [7] Satoh, I.: A Component Framework for Document-Centric Network Processing, *Proc. of the 7th IEEE/IPSJ International Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2007)*, pp. 1-7 (2007).
- [8] Teranishi, Y.: PIAX: Toward a Framework for Sensor Overlay Network, *Proc. of the 6th IEEE Conference on Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2009)*, pp. 1212-1216 (2009).
- [9] Novak, D., Kyselak, M. and Zezula, P.: On Locality-sensitive Indexing in Generic Metric Spaces, *Proc. of the 3rd International Conference on Similarity Search and Applications (SISAP 2010)*, pp. 59-66 (2010).
- [10] Widom, J. and Ceri, S.: *Active Database Systems: Triggers and Rules for Advanced Database Processing*, Morgan Kaufmann (1996).