

4-2 IoT 技術の検証を可能とするテストベッドの研究開発

4-2 *Research and Development of Testbed that Enables Evaluation of IoT Technologies*

明石邦夫 井上朋哉 榎本真俊 宮地利幸 三輪信介 湯村 翼

AKASHI Kunio, INOUE Tomoya, ENOMOTO Masatoshi, MIYACHI Toshiyuki, MIWA Shinsuke, and YUMURA Tsubasa

我々は 2002 年から ICT 技術の検証を行うための大規模エミュレーション環境 StarBED の研究開発とその運用を行ってきた。StarBED はもともと、実環境用の機材（一般的な PC やネットワーク機器）とその上で動作するソフトウェアそのものを動作させるエミュレーションに着目したテストベッドであるが、無線技術や物理環境と密接な関係を持つ Internet of Things (IoT) の検証を可能とするための拡張を行った。有線環境にシミュレータで計算したパラメータを適用することで無線環境を模倣する NETorium、物理的な要素の移動や障害物の位置をシミュレーションで計算し、エミュレーションと連携させることでより柔軟な検証を実現した Smithsonian など我々が開発した技術により本環境構築が可能となっている。本稿ではこれらの取組について述べる。

Since 2002, we have been researching and developing StarBED, a large-scale emulation environment (testbed) for evaluating ICT technology, and operating it. Originally, StarBED focuses on emulation that operates equipment for the real environment (general PCs and network equipment) and the software itself that runs on them. We expanded the testbed to enable evaluation of the Internet of Things (IoT) that has a close relationship with wireless technology and behavior of physical environment. This environment is realized by the technology we have developed.

NETorium is a technology that imitates a wireless environment by applying parameters calculated by a simulator to a wired environment and Smithsonian has realized evaluation that incorporates emulation and simulated movements of physical elements and obstacles. This paper describes these efforts.

1 まえがき

テストベッド研究開発運用室では 2002 年から、北陸 StarBED 技術センターに設置されている大規模エミュレーション基盤 StarBED [1] を用いた研究開発とその運用を行ってきた。平成 28 年度から開始した第 4 期中長期計画では StarBED4 (スターベッド・フォース) プロジェクトとし、これまで主に ICT 技術の検証基盤として開発を進めてきた StarBED の機能を拡張し、IoT 技術の検証を可能とするための研究開発を実施した。インターネットや企業内ネットワークで利用されているハードウェア・ソフトウェアをそのまま動作させるエミュレーション技術を使った検証は、環境構築のコストが大きいと、大規模な実験を行うことが一般的に難しい。StarBED の特徴は、このエミュレーション技術を用いて、大規模な検証環境を構築し、精緻な実験を実施できることである。StarBED4 プロジェクトでの達成を目指す IoT 技術の検証基盤でも、

この特徴を活かした環境の提供を目指し研究開発を行った。

IoT 検証基盤として StarBED を飛躍させるためには、移動体やセンサといった IoT デバイスとその上で動作するソフトウェア、無線環境、温度場や湿度場といった物理場、人や車などの移動体の動きなどを StarBED の上に再現する必要がある。エミュレーション基盤として、多種多様な IoT デバイスや移動体のハードウェアそのものを StarBED の一部として用意することも選択肢の一つとして考えられたが、汎用テストベッドとしての柔軟性が失われ、様々な運用負荷が増大するといった懸念があるため、機材としてはこれまで通りの一般的な PC を用意し、その上に様々な技術を用いて、IoT 技術が必要とする環境を構築することとした。ICT 技術についてはエミュレーション技術を使って環境を構築し、IoT デバイスの導入については仮想マシンを活用、物理場の変化と移動体や人の挙動部分については数式等でのモデル化を前提とする

シミュレーション技術を用いて再現し、エミュレーション環境とリアルタイムで接合することで、人・地形・天候などをも取り込んだ実証環境の構築を実現した。本稿ではこれを実現するための個別の技術について述べる。

2 IoT テストベッドとしての StarBED

前述のとおり StarBED を IoT テストベッドとして提供するためにいくつかの技術を開発した。IoT テストベッドとしての StarBED の概略を図1に示す。前述のとおり StarBED には基本的には一般的な PC を用意し、その上で汎用的なオペレーションシステム (OS) やアプリケーションを動作させることで検証を行う。また、近年では、物理的な PC 上にソフトウェア的に仮想 PC (仮想機械、Virtual Machine : VM) を動作させることで別の OS や、設定が異なる同種の OS を動作させることが可能である。我々はこの技術を採用し、多数の要素が動作する環境の構築や、異なる CPU 上で動作するソフトウェア群を本環境に導入した。無線技術は近年標準的に使われてきており、無線接続を前提としたハードウェアとその上で動作するソフトウェアの数も当然増加してきており、ハードウェア及びソフトウェアの検証も重要になっている。StarBED には有線で接続された環境のみが用意されており、無線接

続そのものを提供することはできない。このような環境上でも無線接続を前提としたアプリケーションの検証を可能とするため、有線リンクを無線リンクに見せかける NETorium [2] 及び BluMoon [3] の開発を進めてきた。また、人の動きや浸水等による移動可能範囲の変化は従来の StarBED が対象としている ICT 技術の範囲外の事象であり、その予測などには一般的に数値計算等のシミュレーションが用いられている。我々の環境でも、ICT 技術そのもの以外のオブジェクトの動作については、シミュレータ等を StarBED 上の汎用 PC の上で動作させ、連携させるシステム Smithsonian を構築した。

本節ではこれらのシステムについて述べる。

2.1 IoT デバイスエミュレータ

StarBED では、IoT 技術の検証もできるだけ実環境と同一の実装を動作させる方針をとっている。しかし IoT デバイスに関しては多種多様な物が存在し、これまで対象としてきた ICT システムよりもはるかに巨大なシステムの構築が必要となり、物理的な管理コストはこれまでに比べ増大することが予想される。そこで我々は IoT デバイスに関しては仮想機械を用い、ソフトウェアレベルでは実環境と同様のものを扱うが、ハードウェア部分に関してはエミュレーション技術を採用することとした。複数のデバイスの仮想機械を用

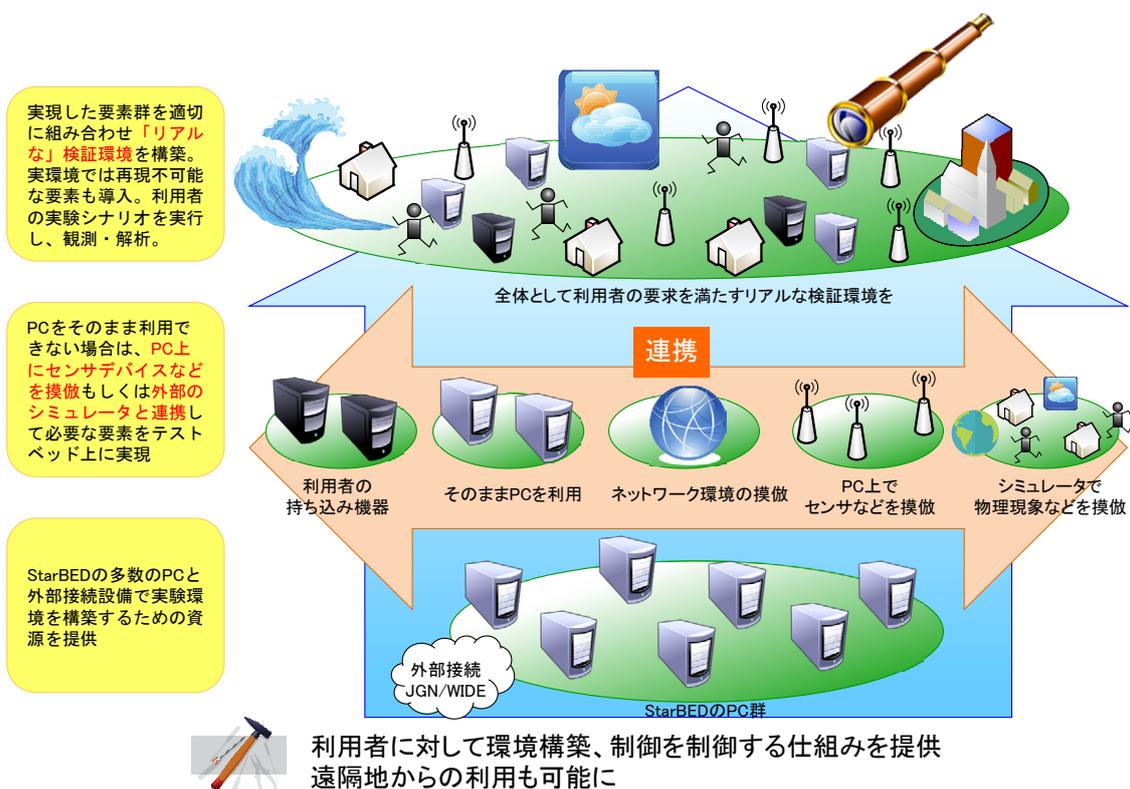


図1 IoT テストベッドとしての StarBED 概略

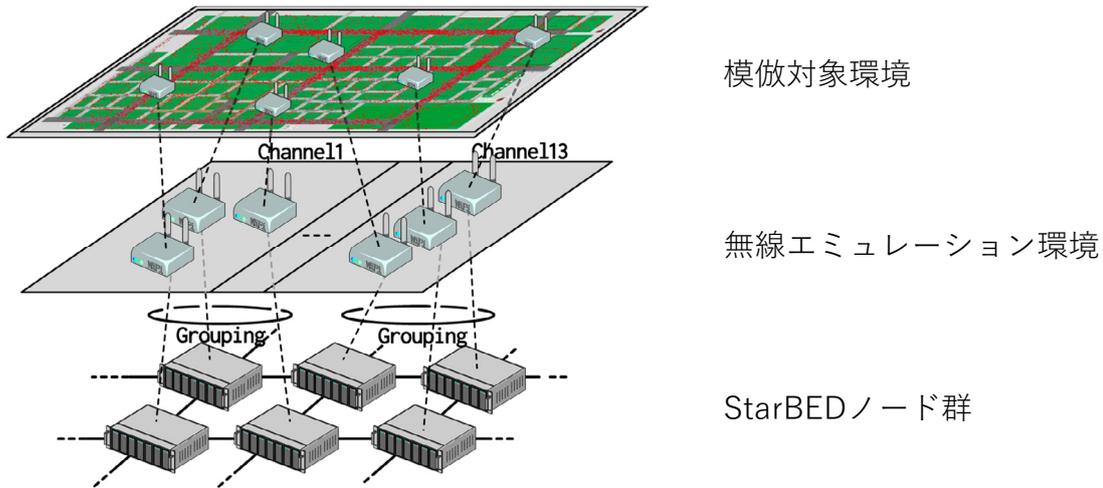


図2 無線エミュレーション概要

意することで、規模や割合を柔軟に変更することができ、更に管理コストを削減することが可能となった。

我々は、広く普及しているスマートフォンについて、フィールドレベルの検証を可能とするために、Android 端末へのセンサや UI への入力の実験とそれに伴うアプリや Android OS と各種のセンサの振る舞いを含めた、Android 端末の挙動の模倣を行う既存の Android エミュレータを、多数動作させ、センサや UI への入力や出力を自由に取り出すことができるフレームワークとして Gigandroid [4] の開発を行い、1,000 台規模の Android が動作する検証環境の構築を可能とした。

また IoT 技術に利用されることが多いマイクロコントローラのエミュレータを開発した。ARM プロセッサを搭載した Atmel SAMD21 (ARM Cortex M0+) 及び NXP KinetisK64 120 MHz (ARM Cortex M4) の 2 種類をリファレンスモデルとして選定して新規開発し、それぞれで動作するソフトウェアを StarBED 上の検証環境に導入することを可能とした。本エミュレータのデプロイには煩雑な作業が必要となるため、Docker コンテナを活用し、本作業を簡略化するための機構の開発も実施した [5][6]。

2.2 無線リンクエミュレータ NETorium 及び BluMoon

StarBED は有線ネットワークにより構築されたテストベッドであるが、無線環境を前提にしたアプリケーション等の検証を行うため有線環境上で無線環境を検証するための技術として NETorium の開発を進めてきた。NETorium は、Linux に含まれている mac80211_hwsim の機能を利用し、有線ネットワーク上の Linux ワイヤレスプロトコルスタックによって処理されたフレームをカプセル化した上で外部へ送信し、

他の PC との通信を可能とするため一台の PC に閉じず環境の大規模が可能である。NETorium は、無線端末間の接続品質を統計的な値として適用する Meteor とフレームの同時受信時の衝突などを模倣する Asteroid の二つの要素で構成されており、Meteor が利用するパラメータについては外部のシミュレータにより計算されることを前提としている。また、Meteor はレイヤー 3 ネットワークプロトコルから完全に独立しているため、従来のエミュレータとは異なり、IPv4 と IPv6 双方に対応が可能である。

IEEE 802.11 ファミリーに対して Bluetooth に対応した無線リンクエミュレータとして BluMoon の開発も進めてきた。BluMoon も NETorium と同様に Linux 上で動作し、Bluetooth が設計上、Host-Controller Interface (HCI) を通じて接続されるため、Controller 部分をエミュレーション用に実装し、送受信側でカプセル化されたパケットをやりとりすることで Bluetooth の通信を再現している。NETorium と同様に Linux 向けの一般的なアプリケーションからは Linux Kernel が提供するネットワークインタフェースより先での処理を行っているため、実環境用の実装を動作させることが可能である。

図2に無線エミュレーションの概要を示す。

2.3 シミュレータ・エミュレータ連携基盤 Smithsonian

人流や災害時の地形等の変化のシミュレーションについては、東日本大震災以降、様々な組織が様々な手法を用いて研究開発を進めている。StarBED における IoT テストベッドにも人流等の特性を取り入れることで、より具体的かつ実用性の高い検証を実施できるが、新たにシミュレータやそのモデルを構築するコストは低くない。そこで、既存のシミュレータと StarBED 上

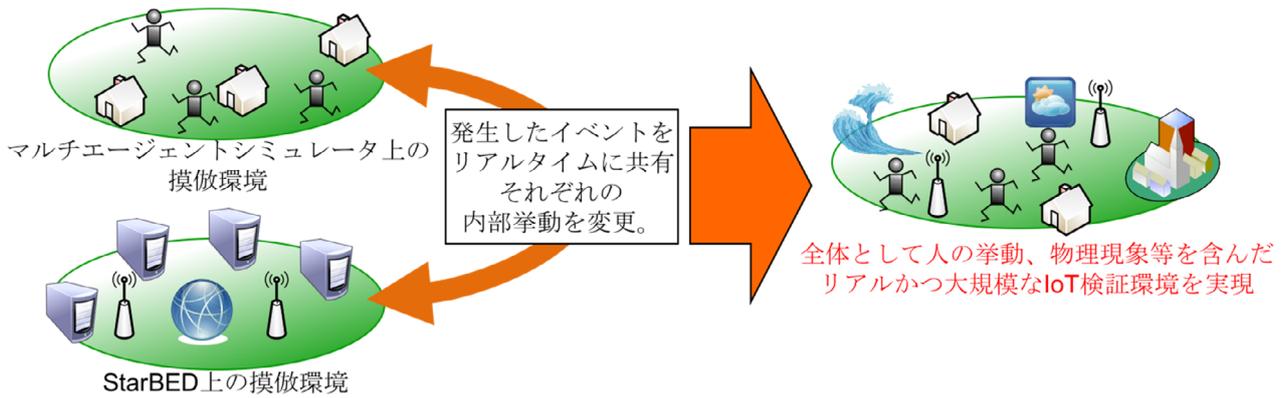


図3 シミュレータとエミュレータの統合環境

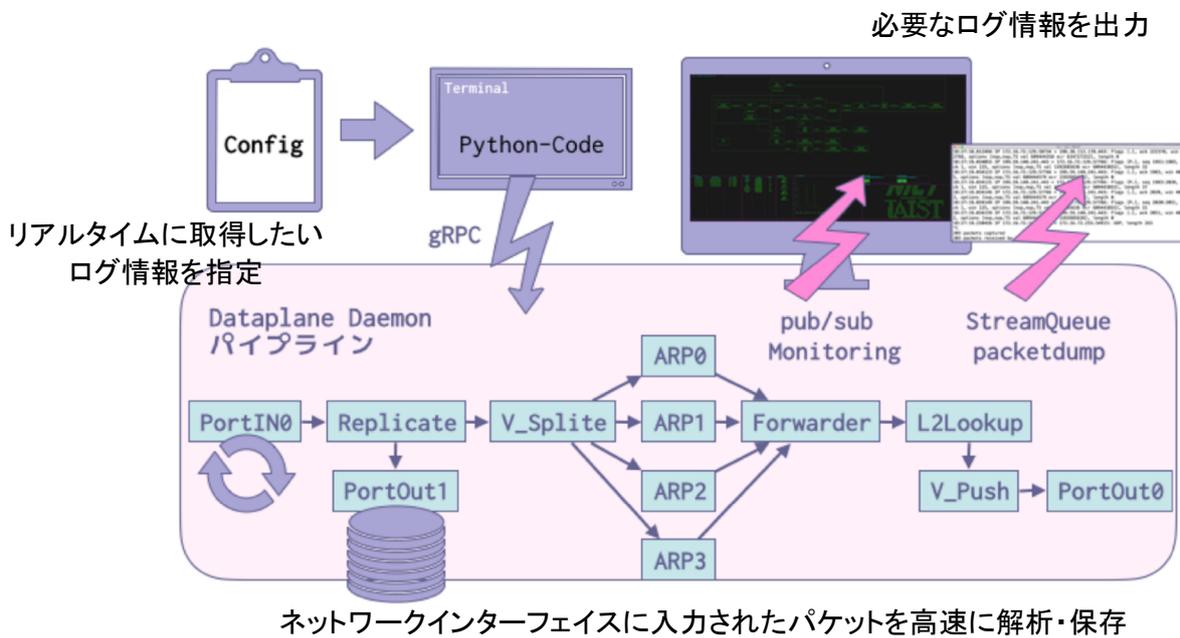


図4 10 Gbps 超のログ配信／記録システム JAlan

に構築したエミュレーション環境をリアルタイムに接合し、それぞれで発生したイベントを共有することで、ICT 基盤から人の動きまでをカバーする実証基盤を構築するためのプラットフォームを構築した。図3に示すように、既存のマルチエージェントシミュレータのプラグインとしてシミュレータ内部の任意の位置の情報を取り出し、さらに、ICT 環境上でのイベントを入力するシステムとしてシステムとして実装を行った。

2.4 広帯域のトラフィック観測を可能とする JAlan の開発

StarBED では一台の PC を一人の利用者が占有することや、物理的なネットワーク構成としてボトルネックを構成しないことで、利用者間の実験の相互影響を排除するような構成を取っている。一方で実験実施のコストを低減するためには、ハードウェアでの制限だ

けでなく論理的な分割についても考慮し Software Defined Testbed 技術としての研究開発を実施した。論理的にネットワークを切り出しそれぞれに必要な特性を持たせるための Software Defined Network (SDN) 技術は広く利用されており、テストベッド環境も仮想化を行い柔軟にリソースを利用したいという要求がある。しかし、パフォーマンス検証のためには一般的に保証される最低性能だけでなく、設定された性能上限を越えた場合にも環境的に余裕があったとしてもそれ以上の処理を制限する必要があり、既存の SDN 技術を活用しにくいという点があった。また実験中に即座に任意の位置のトラフィックを確認したいという要望があり、高速なトポロジ変更を可能とし、大量のログ情報を保存するための機構の開発を行った。トポロジ上の任意の位置のトラフィックを 10 Gbps 超で受信できる JAlan (図4) を開発した。

3 ユースケース

我々はこれまでで紹介した技術を連携させいくつかのユースケースを構築している。本節ではこれらのユースケースについて述べる。

3.1 Bluetooth Low Energy を使ったモバイルアプリケーション検証システム (AOBAKO)

美術館の展示物や商店街などのロケーションに依存した情報を提供するため Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコンを用いたアプリケーションが提供されることが多くなっている。美術館では展示品に近づくとその展示品に関するデータがスマートフォンに表示されたり、商店街では割引クーポンなどが送られるといったものである。こういったアプリケーションは



図5 AOBAKO 動作図

ビーコンの設置場所や電波状況によって影響を受け、実際の場所で検証を行う必要がでてくるが、美術館の休館日や商店街でも人がいない時間帯を調整して検証を行うなどが必要で実地での確認はコストが大きい。このような実地での検証の回数を低減するため、無線環境を模倣する環境を構築している。BLE のエミュレータとしては昨年度から BluMoon として開発を進めてきたが、この技術を活用して AOBAKO [7] (図5、6) を実現した。ユーザが AOBAKO DESK 上で、ビーコン発生器及び端末に見せかけた紙製のコマを任意の位置に置くことで、それぞれの位置を指定し、その位置を画像認識で取得、その状況を StarBED の有線ネットワーク上に模倣、AOBAKO SCOPE 上に模倣状況を表示する。BLE の通信状況として減衰や衝突などがこの時点で模倣されており、StarBED の PC 上で動作するアプリケーションの検証が可能である。また、これと同時に、AOBAKO BOX に設置された BLE ビーコン発生器から AOBAKO BOX で指定された位置状態に応じた伝搬状況で BLE ビーコンを送出する。これにより、実際のスマートフォンデバイスとアプリケーションの検証を実現した。

3.2 Smithsonian による IP 電話環境模倣事例 (Jonathan)

シミュレータ・エミュレータ連携基盤 Smithsonian を利用したデモンストレーションとして Jonathan [8] を構築した。本事例では株式会社構造計画研究所が開発しているマルチエージェントシミュレータ artisoc と StarBED 上で動作させたエミュレーション環境を接続している。artisoc では 100 人の人の移動(ここで

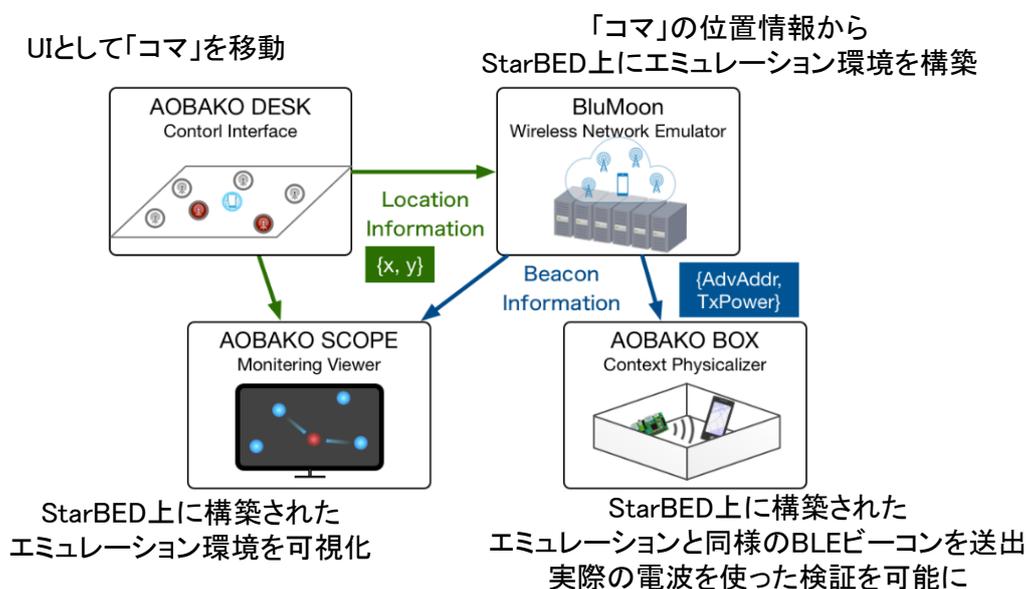


図6 AOBAKO 構成図

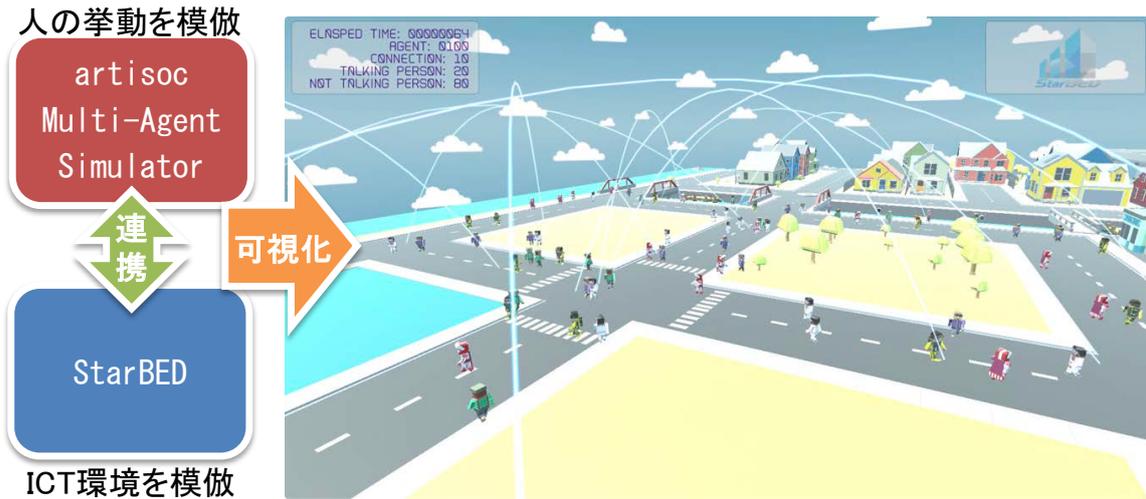


図7 Jonathan 構成図

はランダムウォーク)と、IP電話での通話のタイミングを模倣している。StarBED上にはIP電話を動作させる一連のソフトウェア群を用いた環境が構築されており、シミュレータが決めたタイミングと通話相手に対してダミートラフィックを生成する。このとき、StarBED上のエミュレーション環境上で何らかの障害やネットワーク負荷が高かった場合にはコネクションが成立せず、その結果がシミュレータに返され、シミュレータ上の「人」はプログラムされた内容で挙動を変化させる。このようにシミュレータとエミュレータ相互に影響を及ぼすことでそれぞれを連携させた実験の実施を可能とした。なお、この様子はUnityを利用して可視化した。ただし、StarBED上に構築されたネットワーク構成などの表示は省略し、通信している人同士が直接接続されるような表示としている(図7)。

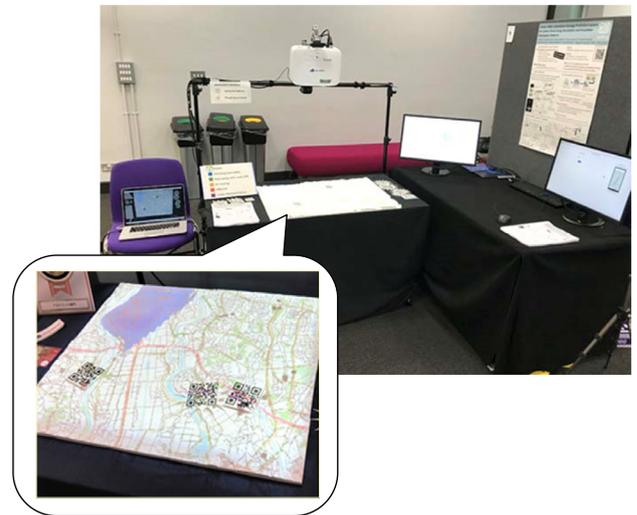


図8 ARIA デモンストレーション環境

3.3 Smithsonian を活用した減災オープンプラットフォーム ARIA の開発

前述のシミュレーションとエミュレーションの連携基盤 Smithsonian を活用し、減災オープンプラットフォーム ARIA [9] を大学と協調して開発した。水害時の避難シミュレーションをユースケースとし、GISデータ、物理モデルによる浸水解析(シミュレーション)、人の移動に関するマルチエージェントシミュレーション、人が持つスマートデバイス及び避難経路検索サーバ(エミュレーション)を連携させ、単一のシミュレーションとして相互の影響を確認できるユースケースを実装した。シミュレータの様々なパラメータを変更しながら、実環境用のハードウェア及びソフトウェア実装の検証が可能となり、また、本プラットフォームにIoTセンサなどからの実データをリアルタイム入力することで、災害発生時に近未来の被害状況を予測し、避難警報などの発令に活用するための検討

を行っている。

図8に ARIA のデモンストレーション環境を示す。水害による被災地の地図情報から3Dプリンタで地形を印刷し、その上にプロジェクションマッピングすることで実験の進行状況として人の移動などを表示している。この上に2次元バーコードを置くことにより、浸水地点や停電が起こった場所などをインタラクティブに挿入することができる。

4 あとがき

我々は第4期中長期計画中に本稿で紹介した技術をはじめ様々な「実験」の高度化に関する研究開発を推し進め、高精度な実験を可能とするだけでなく、その対象範囲を拡大してきた。現在第5期中長期計画が開始されているが、第4期中長期計画での成果を活用して、さらに検証の適用範囲を拡大するための研究開発を行っ

サイバー環境（シミュレータ）とリアル（実システム）、そしてシミュレーション技術で実現されたエミュレータ上で実装を動作させるエミュレーションを組み合わせ、様々な動作モードの切り替えを可能とする検証環境としてサイリアル環境を構築。
Smithsonianを用いシミュレータ・実システム・エミュレータを連携、構成システムの一部を差し替えることで、シミュレータから実環境までの検証を可能とする基盤を構築。

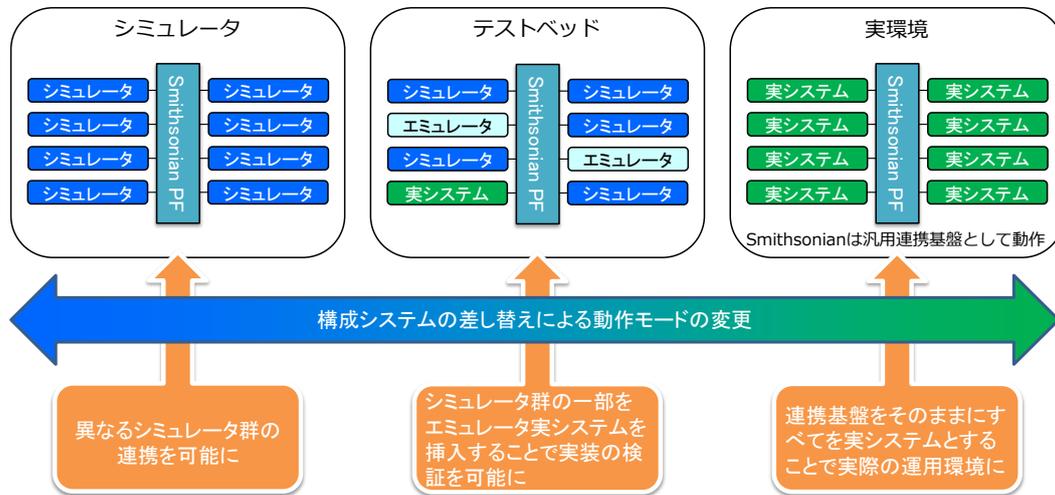


図9 CyReal環境

ている。Smithsonianはシミュレーションとエミュレーションを融合させることにより、ICT技術への入力を多様化させ、またICT技術が持つそれ以外の環境への影響の確認を可能とする技術である。我々はこの考え方を推し進めCyReal(サイリアル)な検証環境の構築を第4期中長期計画後期から開始している。CyRealは我々が構築した造語であり、エミュレーションとシミュレーション、さらに実システムを総合に接続した環境である。図9にCyRealな環境での検証の概念図を示している。図中左端はすべてシミュレータで構成された検証環境であり、それぞれが独立して動作するものの、連携することで一つのシミュレータでは実現できなかった検証を可能とする。このようにそれぞれの要素(左端の例ではシミュレータ)が、一定の規定に従った形で連携をすることで、その要素をエミュレータや実システムに置き換えることが可能となる。実システムが組み込めるため、当然人間もここに加わることが可能であり、システムの検証だけでなく、訓練や、またすべてが実システムに置き換われば、それはそのまま実環境となる。

このような環境構築を行うことを一つの目標として第5期中長期計画でも、テストベッドの研究開発を進めていく。

謝辞

本研究の一部は、総務省・電波資源拡大のための研究開発「IoT 機器増大に対応した有無線最適制御型電

波有効利用基盤技術の研究開発」によって行われた。

【参考文献】

- 1 T. Miyachi, T. Nakagawa, K. Chinen, S. Miwa, and Y. Shinoda, "StarBED and SpringOS Architectures and their Performance," International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TridentCom 2011), April 2011.
- 2 K. Akashi, T. Inoue, S. Yasuda, Y. Takano, and Y. Shinoda, "NETorium: High-Fidelity Scalable Wireless Network Emulator," 12th Asian Internet Engineering Conference (AINTEC 2016), pp.25-32, Nov. 2016.
- 3 T. Yumura, K. Akashi, T. Inoue, and Y. Tan, "BluMoon: Bluetooth Low Energy Emulator for Software Testing," Sensors and Materials, vol.33, no.1 pp.147-169, Jan. 2021.
- 4 三輪信介, "Gigandroid: 多数のスマートフォンを対象としたサービス検証基盤の提案," 第17回インターネットテクノロジーワークショップ(WIT2016), May 2015.
- 5 中村拓人, 大畑誠弥, 湯村, 翼, "エミュレータを用いた大規模IoTシステムテストのための実験環境構築機能の開発," 第28回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.215-218, Nov. 2020.
- 6 大畑誠弥, 中村拓人, 湯村, 翼, "IoTエミュレーションシステムにおける監視制御機能の提案," 電子情報通信学会2021年総大会予稿集, March 2021.
- 7 T. Yumura, M. Enomoto, K. Akashi, F. Hirose, T. Inoue, S. Uda, T. Miyachi, Y. Tan, and Y. Shinoda, "AOBAKO: A Testbed for Context-Aware Applications with Physicalizing Virtual Beacons," 2018 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UBICOMP 2018), pp.476-479, Oct. 2018.
- 8 湯村翼, 榎本真俊, 押川侑樹, 井上 朋哉, 宮地 利幸, "Jonathan: テストベッドにおいてマルチエージェントシミュレータと通信エミュレータを連携する基盤の開発," 合同エージェントワークショップ&シンポジウム2017 (JAWS2017), Sept. 2017.
- 9 K. Hiroi, T. Inoue, K. Akashi, T. Yumura, T. Miyachi, H. Hironaka, H. Kanno, and Y. Shinoda, "ARIA: Interactive Damage Prediction System for Urban Flood Using Simulation and Emulation Federation Platform," 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UBICOMP 2019), pp.284-287, Sept. 2019.

4 NICT 総合テストベッドの新たな可能性に向けた研究開発



明石邦夫 (あかし くにお)

東京大学大学院
情報理工学系研究科
情報理工学教育研究センター
セキュリティ教育研究部門
助教/
総合テストベッド研究開発推進センター
テストベッド研究開発運用室
協力研究員
博士(情報科学)
ネットワーク、ネットワークエミュレーション、サイバーセキュリティ



井上朋哉 (いのうえ ともや)

総合テストベッド研究開発推進センター
テストベッド研究開発運用室
研究員
博士(情報科学)
ネットワークソフトウェア、ネットワークテストベッド



榎本真俊 (えのもと まさとし)

横浜商科大学
商学部商学科
専任講師/
総合テストベッド研究開発推進センター
テストベッド研究開発運用室
協力研究員
博士(工学)
ネットワークテストベッド、制御システムセキュリティ



宮地利幸 (みやち としゆき)

総合テストベッド研究開発推進センター
テストベッド研究開発運用室
副室長
博士(情報科学)
ネットワークテストベッド、エミュレーション



三輪信介 (みわ しんすけ)

総合テストベッド研究開発推進センター
テストベッド研究開発運用室
総括研究員
博士(情報科学)
ネットワークエミュレーション、仮想化、サイバーセキュリティ、テストベッド



湯村 翼 (ゆむら つばさ)

北海道情報大学
情報メディア学部
准教授/
総合テストベッド研究開発推進センター
テストベッド研究開発運用室
協力研究員
博士(情報科学)
ユビキタスコンピューティング、ヒューマンコンピュータインタラクション、ネットワーク