

## 解説

# 分散シミュレーションのための 統合基盤アーキテクチャ HLAの紹介

古市 昌一 furuichi@isl.melco.co.jp  
和泉 秀幸 hideyuki@isl.melco.co.jp  
三菱電機(株) 情報技術総合研究所

### HLAとは?

昨今は遺伝子情報処理にかかわる読者が増えていることから、HLAというHuman Leukocyte Antigen(ヒト白血球抗原)を思い浮かべる方が多いのではないかと想像される。しかし、インターネット上で海外のサイトを中心に検索すると、High Level Architecture(HLA)に関するページが多数みつかることに気付く。その中には.milに代表される米軍の各サイトも多いことから、計算機には関係ない、と早合点してスキップされる方が多いかもしれない。

しかし、High Level Architectureは異機種種のシミュレータを統合するための基盤アーキテクチャであり、分散シミュレーションシステムを実現する上で要となる仕様である。特に米国では、2001年以降国防総省が調達するすべてのシミュレーションシステムにはHLA仕様準拠が義務付けられ、防衛産業界のみならず、ネットワーク型のエンタテインメント業界でも注目されている。

そこで、本稿では2000年9月にIEEEにより標準仕様としての採択が決定したばかりの、「IEEE 1516 - HLA: High Level Architecture for Modeling and

Simulation -」を分かりやすく解説する。

### 異機種シミュレータの統合による分散シミュレーション技術

ここでは、分散シミュレーション技術の重要性とその利点に関して、応用例を2種類用いて説明する。

#### □RoboCup-Rescue災害シミュレータ

情報処理の2000年4月号で紹介されたRoboCup-Rescueプロジェクト<sup>1)</sup>は、大規模な災害発生時の救助問題

を、緊急対応活動を行う多数のエージェントによる知的行動により解くことを目標としている。多数の人が同一の課題をさまざまなアプローチにより解く方法を研究する場合、研究者同士が共有できるツールを持つことが重要である。そのためのツールの1つが「災害シミュレータ」である。

災害のように自然現象と社会現象が互いに複雑に関係する世界モデルは、種々のモデルの複合から構成され、研究が進むにつれてモデルの改良や詳細度の向上が進むと予想される。したがって、後にモデルの交換や追加が容易な、柔軟性のある構成とすることが重要である。

そのための1つが分散シミュレーション方式で、各々独立したモデルをそれぞれ別シミュレータとし、ネットワークで接続して協調動作させる方式である。図-1に、分散シミュレーション方式を用いて災害シミュレータを構成し、スパイラルに開発することにより、段階的に高機能化・高精度化する例を示す。

このように、部品化と統合によりシミュレータの再利用が促進し、大規模シミュレーション・システムの開発コストを低減できることが、分散シミュレーション方式の利点であ

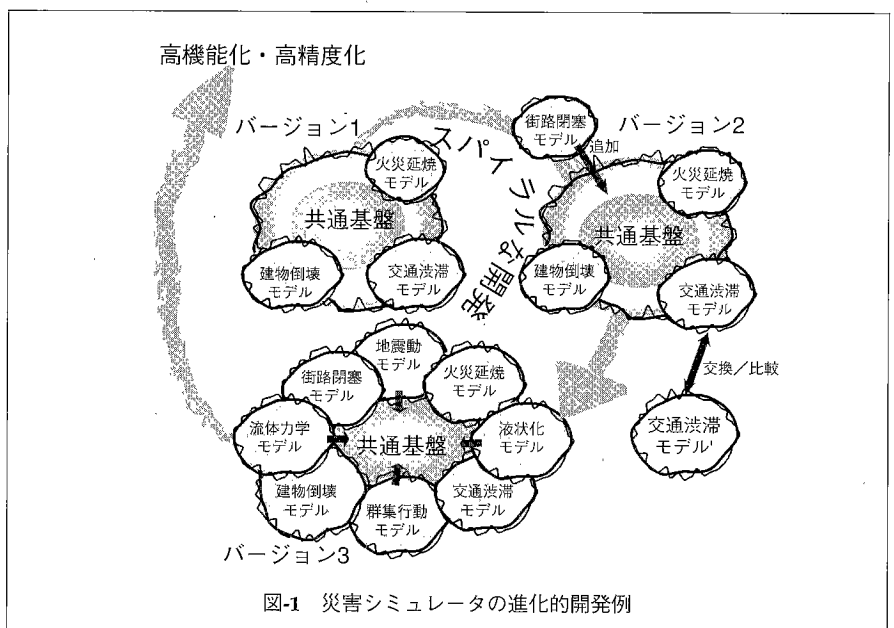


図-1 災害シミュレータの進化的開発例

る。これを閉じたプロジェクト内で利用するだけでなく、広く一般の技術として使える技術とするためには、HLAのような統合のための標準仕様の確立が必要である。

### □訓練用シミュレータ

航空機のパイロットの操縦訓練用シミュレータは、個人の操作訓練を目的としている。一方、チームによる協調作業を訓練する場合には、シミュレータ同士をネットワークにより接続する分散シミュレーション方式が有効と考えられる。

たとえば、米国防総省により1983年から開発が始まったSIMNET (SIMulator NETworking) は、戦術訓練用の戦車シミュレータをネットワークで接続したシステムで、現在全世界の米軍基地11サイトに合計約250台のシミュレータが配備され、米陸軍の戦車部隊訓練で用いられている。

SIMNETは戦車シミュレータ専用だったが、HLAのように汎用の異機種シミュレータ統合のための仕様が確立されれば、防衛用の訓練システムだけでなく、多くの応用に分散シミュレーション技術が適用できる。

### 従来の標準仕様の問題点と HLAにより解決されたこと

HLAの標準化が検討される以前、訓練用シミュレータの分野では、SIMNETの技術を発展させたDIS (Distributed Interactive Simulation) の標準化がなされ、IEEE 1278として多くのシステムで利用されている。では、なぜDISが分散シミュレーションシステムの統合基盤アーキテクチャとして利用できないのか、3つの問題点を指摘して説明する。

第1の問題点は、DISではリアルタイム性のみを重要視し、ベストエフォート通信 (UDP/IP) だけを使う点である。そのため、たとえばフライト

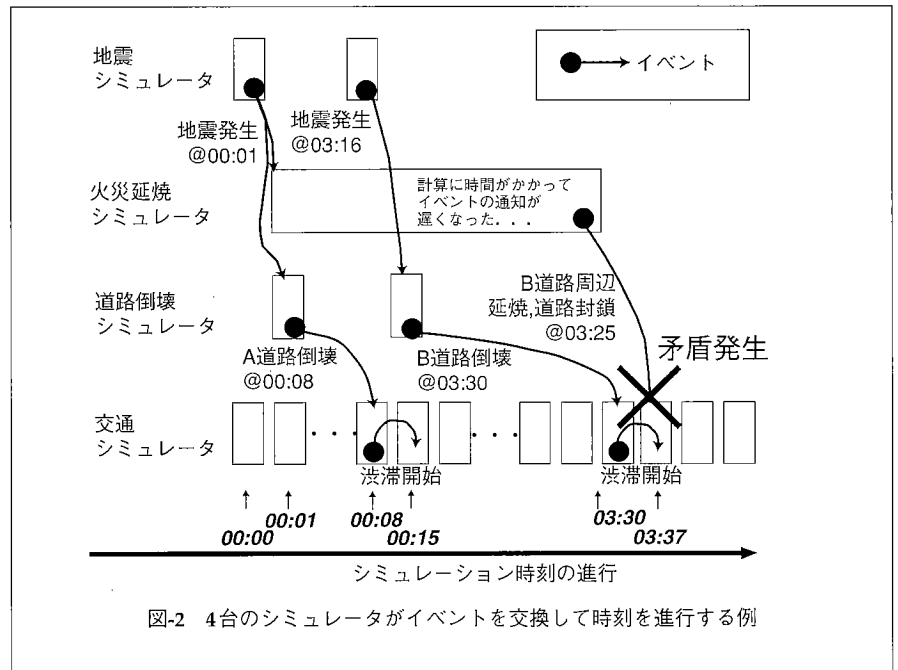


図-2 4台のシミュレータがイベントを交換して時刻を進行する例

シミュレータの画面上で寸前まで見えていた飛行機が突如消えたりすることを、仕様上では許している。このような現象の発生頻度を低くするための工夫もなされているが、根本的にリアルな通信が扱えない限り、論理的に正しく動作することが重要な分散シミュレーションシステムでは利用できない。そこで、HLAでは目的に応じてベストエフォート通信とリアル通信を動的に選択できるよう、仕様が工夫された。

第2の問題点は、DISではシミュレータ間で時刻を同期する機能がない点である。そもそも、DISはシミュレータ内部の時刻 (シミュレーション時刻と呼ぶ) は実世界の時刻と同時に進行するため (リアルタイムシミュレータと呼ぶ)、各シミュレータ間でシミュレーション時刻を同期する機能は不要である。しかし、訓練用以外のシミュレータの多くは内部にシミュレーション時刻を持ち、実時間より速く (あるいは遅く) シミュレーション時刻を進める。また、時刻の進行速度は各シミュレータによって異なる。

図-2に、「地震」、「火災延焼」、「道路倒壊」と「交通」の4種類4台のシミュレータから構成される災害シミュレータが、時刻付きのメッセージ

(イベント) の交換を繰り返して分散シミュレーションを実行する様子を示す。シミュレータ間の時刻の同期はイベントの生成と交換のタイミングで行えばよく、CPUを効率良く利用して時刻をどんどん進めることができる。しかし、すでに過ぎた論理時刻のイベントを受信すると矛盾が生ずるので、このようなことがないように、シミュレータや制御ソフトウェアは工夫する必要がある<sup>2)</sup>。HLAでは、このような論理時刻の同期を簡単に効率良く行えるよう、仕様が工夫された。

第3の問題点は、DISではシミュレータ間で交換するデータの仕様がIEEE 1278の一部として固定的に決まっているため、新しいタイプのシミュレータを追加する際の柔軟性に欠ける点である。

以上指摘した3つの問題点を、HLAではリアル通信の導入、シミュレータ間の論理時刻の同期と柔軟性のあるデータ交換を標準仕様に盛り込むことにより解決した。

### HLAが標準化されるまでの動き

#### □DMSOによるHLAの提案

1990年代初頭、世界で最もヘビー

# High Level Architecture

なシミュレーションシステムユーザである米国防総省では、現場で運用中のシミュレータの種類が数百種を超えて膨大となり、今後の開発・保守コストを低減することが急務であった。そして、1990年よりこれを解決するための研究開発へ巨額の投資が開始された。

その第1段が1991年6月のDMSO (Defense Modeling and Simulation Office, ディムソーと発音する) 設立である。DMSOは、従来は陸・海・空の各軍が独自に実施してきたモデリング&シミュレーション(以下M&S)を統合的に扱う機関で、その第1の成果は、1994年1月に発行したM&Sプロジェクトの憲法的役割を果たす計画書「DoD Modeling and Simulation Master Plan」(DoD Directive 5000.59-P) である。

その後大学や軍の分散シミュレーション研究者を中心に、HLAの仕様を策定するためのチームAMG (Architecture Management Group) が設立され、その第1回会合が1995年3月にDMSOで実施された。そして2カ月後の1995年5月には「HLA - Version 0.0 Interface Specification -」が公開され、続いて0.1版が7月、0.2版が10月、そして1年後の1996年8月にHLA仕様の第1.0版が完成した。

## □IEEE標準化までの道のり

HLA仕様の第1.0版完成直後の1996年9月、米国防総省は2000年までにHLA仕様をIEEE標準とすることと、2001年以降はHLAに準拠しないシミュレータを調達しないことを宣言した。当時HLAをベースとした分散シミュレーションシステムは存在せず、大変冒険的な発言であったが、この宣言を契機に研究開発は一気に加速していった。

まず、HLAのIEEE標準化を推進するために学会SISO (Simulation Interoperability Standards Organization Inc., <http://www.sisostds.org/>) が設立され、技術的な議論はSISOが年2回開催するSIW (Simulation Interoperability Workshop) で行われるようになった。SIWは毎回1,000人以上が参加する大変大きな国際会議である。1割以上は米国以外からの参加者で、HLAの仕様が米国以外にとって不利益とならないよう、ISAG (International Simulation Advisory Group) を組織してさまざまな活動を行っている。ちなみに、現在筆者の古市はISAGの日本支部代表を務めている。

## □IEEEによるHLAの承認

その後HLAの仕様は改版を重ね、1998年2月の1.3版Draft 9がSISOとしてのHLA仕様の最終案としてまとま

った。これをベースにIEEE1516 Draft 1 (Draft Standard for Modeling and Simulation High Level Architecture, <http://www.dmsomil/index.php?page=121>) が1998年4月に作成され、改訂を重ねて2000年5月のDraft 5が、2000年9月にIEEE標準化委員会により採択された。

## HLAで決まっていること：仕様概説

HLAは、ルール (IEEE 1516)、インタフェース仕様 (IEEE 1516.1)、オブジェクトモデルテンプレート仕様 (IEEE 1516.2) の3つの仕様から成り立っている。

## □IEEE 1516ルール

「ルール」は、HLAが規定する範囲を明確にするため、用語の定義やそれぞれの動作の基本を規定したものである。たとえば、個々のシミュレータをフェデレートと呼び、その集合である分散シミュレーション全体をフェデレーションと呼ぶことや、フェデレート間は直接情報を交換することなく、RTI (Run-Time Infrastructure) と呼ぶソフトウェアを介して行うことなど、10種類のルールが規定されている。

## □IEEE 1516.1 インタフェース (I/F) 仕様

「I/F仕様」は、シミュレータとRTI間のサービスの仕様を規定したもので、各言語 (C++, Java, Ada, CORBA IDL) ごとのAPI (Application Program Interface) を定めている。また、このインタフェース仕様で規定されたサービスを提供するソフトウェアをRTIと呼ぶが、RTIの実装法や通信プロトコルの詳細に関しては規定していない。CORBA処理系の上に実装したDMSO RTI-NG 1.3を代表に、スウェーデンのPitch社がJava上に実装したpRTIや、筆者らがTCP/IP Socket上に開発した

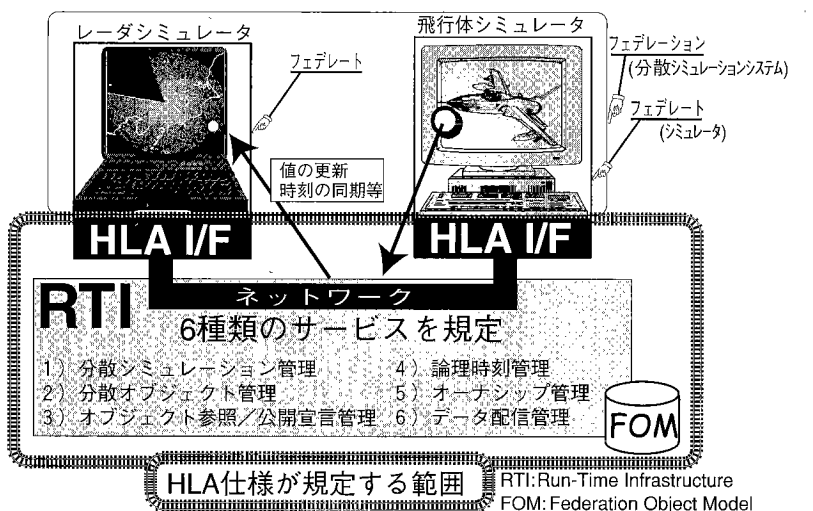


図-3 分散シミュレーション統合アーキテクチャHLA

eRTI (experimental RTI) 等, いくつかの方式による RTI の実装が試みられ, それぞれ性能面やポータビリティ等で特徴を持たせている。

#### □IEEE 1516.2 オブジェクト

##### モデルテンプレート仕様

この仕様は, 個々のシミュレータ間でのデータ交換を行うときに基本となる, 外部から参照可能なオブジェクトやその属性を定義する SOM (Simulation Object Model) と, 分散シミュレーション全体で共通するオブジェクトやその属性を定義する FOM (Federation Object Model) の定義方法を規定する。FOM は, 異機種分散シミュレーションにおいて柔軟性のあるデータ交換仕様を実現し, シミュレータの再利用の要となる仕様である。

#### □HLA 分散シミュレーションの構成

図-3 に, HLA に基づく分散シミュレーションシステムの構成を示す。図に示すように, HLA に準拠した各シミュレータは, I/F 仕様により規定された6種類のサービスに属する各 API を使って RTI とメッセージを交換することにより, 他のシミュレータとのデータ交換や時刻の同期を行う。

各機能の詳細に興味がある方は, IEEE 1516 の Draft 1 か, 後述する DMSO RTI-NG 1.3 に添付される各ドキュメントを参照してほしい。

### HLA の利用例

#### □軍事用シミュレータ

HLA の適用が最も進んでいるのは, 軍事用のシミュレータである。米国防総省が保有しているほとんどのシミュレータは, 2000 年 10 月 1 日までに HLA 化が完了した。北大西洋条約機構 (NATO) も HLA の採用を早期に決定し, 日本の防衛庁も 1996 年

9 月に研究所レベルでの採用を SIW で発表して以来, 研究開発が続けている。ここでは, 代表的な適用事例である米国の JSIMS (Joint Simulation Systems), WARGAME 2000 と CGF (Computer Generated Forces) を紹介する。

1996 年から 5 カ年計画で開始された JSIMS は, 指揮官をはじめとする幕僚が指揮能力の訓練を行うためのシミュレーションシステムである。一般的に陸・海・空の各軍は組織も活動単位も指揮統制系も大きく異なるので, 従来のシミュレータは別個に開発されて運用されてきた。しかし, 災害救助や有事防衛に代表される全軍統合作戦の訓練を行うためには, 各シミュレータを統合して, 全軍の指揮官が同時に訓練に参加することが重要である。さらに, 近年は PKO (平和維持活動) の訓練への対応も要求されており, 組織や文化がまったく異なる多国籍軍を扱う必要が出てきた。

そこで, JSIMS ではまずシミュレーションエンジンや実世界の概念のモデル化支援ツール等, 共通技術部分を新たに開発している。そして, その上に各軍ごとのシミュレータを開発し, 最終的に HLA をベースとした分散シミュレーションシステムとしての統合を目指して研究開発を進めている。

1997 年より開始された WARGAME 2000 は, NMD (National Missile Defense) に代表される防空システムの能力評価や, 防空指揮所のオペレータの訓練を行うための, HLA ベースの分散シミュレーションシステムである。各シミュレータ上では, たとえばレーダの信号処理のような詳細レベルのシミュレーションを行うのが特徴で, JSIMS のようにマクロな作戦命令を扱うレベルとは異なる。本システムは研究開発と並行して 1999 年から実際の訓練で用いられている。

CGF は, 知的エージェント技術を応用した航空機など移動物体の自動操縦模擬技術である。その目的は, シミュレータを用いた訓練の質の向上と省力化であり, HLA の標準化が検討される以前から研究開発が進められてきた。CGF を実装したソフトウェア (たとえば ModSAF) は HLA 化が進み, JSIMS をはじめとする多くのシステムの自動模擬部分での活用が促進されている。同じ技術がエンタテインメント用のネットワークゲームに応用されるのも, 遠い将来のことではないだろう。今後は一層知的レベルを向上するための研究が促進され, 特に, 多数のエージェント間の協調処理の研究が重要になると予想される。

#### □宇宙飛行士訓練用システム

パリに本部がある ESA (欧州宇宙機構) では, 宇宙飛行士の訓練用システムと, 衛星運用地上局の管制官の訓練を行うシステムを, HLA ベースの分散シミュレーションシステムとして構築している。特に, 各国の宇宙飛行士が宇宙空間上で共同で作業を行う ISS (International Space Station) の中で, ESA とロシアが開発を担当するシステムは HLA 仕様になっている。これにより, 宇宙飛行士が 1 カ所に集まらなくても訓練が可能となるだけでなく, 各国が持つシミュレータを有効に活用することによって, 訓練の回数と質の向上が期待できる。

#### □大規模交通シミュレータ

交通渋滞の原因の解明や, 最適な信号制御を行うための研究用ツールとして, さまざまな大規模交通シミュレータの研究開発が行われている。特に, そのうち 2 つの研究グループでは, ドライバの行動モデルから信号の制御モデルに至るまでの, 複雑でさまざまなモデルから構成さ

# High Level Architecture

れる道路交通モデルの構築に、分散シミュレーション方式を活用している<sup>3), 4)</sup>。筆者らのチームでは、さらに並列分散処理による高速化の手段としてHLAを活用する研究を行っており、HLAの適用分野の拡大に寄与できると考えている。

## □設計製造支援用

### シミュレーション

設計製造の分野においては、コンピュータ内部に構築したCADモデルとその可視化ツールを駆使することにより、部品の設計、組立てや製品の運用から補修に至るまですべてシミュレーションで行い、新製品の開発期間短縮とコストの大幅削減を目指している。

これを実現するためには、各企業間で利用するCADデータやシミュレータの共通化と、ネットワークを介した接続が必要であり、製造業各社がコンソーシアムを設立して共同研究開発を行うことが重要である。このような目標を掲げたプロジェクトは多数あるが、その中でHLAを採用した進行中のものは以下の2つで、製造業各界からその成果が期待されている。

- MISSION : Modeling and Simulation Environments for Design, Planning and Operation of Globally Distributed Enterprises. 日本、ヨーロッパと米国の製造業各社および大学等の研究機関から構成される。  
<http://www-plt.ipk.fhg.de/mission/>
- EDISON : European Distributed Interactive Simulation Over Network. 欧州各国の製造業各社から構成される。  
<http://cec.to.alespazio.it/EDISON/>

## HLAの課題と今後の展望

訓練用のシミュレータから設計製造用シミュレータに至るまで、今後分散シミュレーション技術とHLA

がさまざまな分野で利用されるのは間違いない。特に、米国防総省が調達するシミュレーションに関連するソフトウェアは、2001年よりすべてHLA準拠となることは前に述べたとおりである。その中には、シミュレータの開発支援ツールや、コンピュータゲームのCG作成で用いられる各種アニメーション作成ツール、プログラム作成支援用の各種CASEツール等も含む。したがって、読者の皆さんが日頃よく使っている各種のソフトも最新版はすでにHLA準拠となっている例が多い。

HLAはすでにIEEE標準化という提案当初からの大きな目標の1つをクリアし、普及を開始している。しかし、本格的に実用化するにはまだ解決すべき課題がいくつか残っている。

第1の課題は、HLA分散シミュレーションの実行時に必須となるソフトウェアRTIの性能の問題である。HLAの構成上、RTIはシステム全体の性能を左右する大変重要なものである。しかし、DMSOが開発してバイナリをフリーで公開しているDMSO RTI-NG 1.3 (<http://sdc.dms0.mil/>) は現在最も利用されているが、シミュレータ台数を増やした場合の性能と安定性に難点がある。

一方、筆者らはHLAの早期実用化に向けて、1996年よりeRTIの試作を行っている<sup>5)</sup>。DMSOのRTIの初期バージョンが一般公開される以前の1997年3月には、SIWに併設される展示会へ出展した (<http://www.sisostds.org/siw/97spring/exhibits/exhibit.htm>)。それ以来DMSO RTIに比べてeRTIは性能面と安定性の面で勝っている<sup>6)</sup>。今後DMSO RTI-NG 1.3の改良と性能向上は進むであろうが、バイナリのみフリーで配布されるソフトを製品に組み込むのは事実上困難である。したがって、DMSO RTIのオープンソース化や、さまざまな特徴を

持った製品版RTIの開発が進むのではないかと予想する。

第2の課題は、現在のHLAの仕様では、再現性のあるシミュレーションの実行を保証できない点である。再現性を実現するためには、シミュレータ間で交換するすべてのメッセージにタイムスタンプを付ける必要がある。しかし、現仕様のHLAではタイムスタンプを付けられない機能がある。したがって、再現性を実現するにはユーザ側でさまざまな工夫をする必要がある。

その他にも、異なるRTI同士を接続する際の問題や、WAN上で実行する場合の秘匿性の問題等、汎用的な分散シミュレーションのための統合基盤アーキテクチャとして、HLAにはまだ完璧ではない部分が残されている。

これらの課題を解決するには、今後さらに多くの研究者がHLAの研究に取り組むことが重要である。特に、並列処理や分散処理のアプリケーションの1つとしてHLAに取り組む研究者の存在が欠かせない。それにより今後HLAの仕様自体が加速度的に進化し、普及にもさらに拍車がかかるであろう。

### 参考文献

- 1) 田所 諭, 北野宏明, 高橋友一, 松野文俊, 竹内都雄: RoboCup-Rescue 情報科学の緊急災害対応問題への挑戦, 情報処理, Vol.41, No.4, pp.412-418 (Apr. 2000).
- 2) Fujimoto, R.: Parallel and Distributed Simulation Systems, John Wiley&Sons, Inc. (2000).
- 3) Klein, U., Schulze, T. and Straburger, S.: Traffic Simulation Based on the High Level Architecture, Proc. of the 1998 Winter Simulation Conference, pp.1095-1103 (1998).
- 4) Ozaki, A., Furuichi, M., Nishi, N. and Kuroda, E.: High Level Architecture in Car Traffic Simulations, IEICE Trans. Inf.&Syst., Vol.E83-D, No.10, pp.1851-1859 (2000).
- 5) Furuichi, M., Mizuno, M., Miyata, H., Miyazawa, M., Matsumoto, S. and Aoyama, K.: Design and Implementation of Experimental HLA-RTI Without Employing CORBA, Proc. of the 15th DIS Workshop, Vol.1, pp.195-201 (1996).
- 6) 古市昌一, 渡部修介, 水野政治, 和泉秀幸, 佐藤啓紀, 徳本修一, 尾崎敦夫: HLAをベースとした並列分散シミュレーションの実現 - eRTI 1.3とDMSO-RTIの性能比較 -, 第60回情報処理学会全国大会 (2000).

(平成12年11月1日受付)

