ネットワークシミュレーションにおける 並列処理高速化技術と評価シナリオ構築環境 —QualNet と Scenargie—

High Performance Simulation Technology and Evaluation Scenario
Management Framework — QualNet and Scenargie —

高木由美^{†1} Yumi Takaki^{†1}, 太田 能^{†1} Chikara Ohta^{†1}
金田 茂^{†2} Shigeru Kaneda^{†2}, 高井峰生^{†3} Mineo Takai^{†3}

Summary

本稿では、商用シミュレータ QualNet と Scenargie の解説を行っている。両シミュレータとも基本設計から並列処理による高速化を念頭に置いて設計されている点に特徴があり、忠実なモデルの実行やシミュレート可能なネットワーク規模の増大に寄与している。また後発の Scenargie は、実世界の表現能力を向上させることや性能評価作業の効率を改善することを念頭に開発が進められている。QualNet については、その開発の歴史として、並列処理ライブラリ PARSEC や QualNet の前身である GloMoSim の並列処理高速化技術、商用シミュレータとしての QualNet の特徴について解説している。Scenargie については、そのねらいである実世界の表現能力の向上を実現する GIS (Geographical Information System) 技術とマルチエージェントシミュレーション技術、シナリオ構築及び評価結果の集計・分析の効率化を実現する GUI によるシナリオ構築環境やデータベースとの連携技術について解説している。

Key words

ネットワークシミュレータ, 並列分散処理, QualNet, Scenargie

1. ま え が き

情報通信システムは絶えず高速大容量化が求められており、また近年は通信品質制御といった多様なサービスの実現が望まれている。通信方式やネットワーク制御はより高度で複雑なものとなり、また通信品質制御の評価に当たっては、よりユーザに近い評価尺度でもってシステムの良し悪しを議論することが求められている。その結果、情報通信システムの研究・開発においては、複雑化するネットワークシステムをある特定の層に閉じることなく上位層まで含めて総合的に評価することが必要となっている。このためシステム評

価ツールとしてネットワークシミュレーションが注目されている。

ここでユーザがネットワークシミュレータ^{*1}を選択する際に注意を払うべきことを、実世界の表現能力、実世界との連携、モデル開発の容易性、統計処理の信頼性、性能評価作業の効率化の観点から述べたい^{*2}。

① 実世界の表現能力

ネットワークシミュレータのユーザは、実世界と同じようなシナリオのもとでは実世界と同じような結果が得られる、つまり実世界の高い再現性を期待している。また現実的なシナリオでもってシミュレーションできることを期待している。高い再現性を実現するためには、シミュレータが実世界（物理現象やプロトコルの振舞い）をより忠実にモデル化している必要がある。ただし、あまりにも詳細なモデル化は計算処理量を増

^{†1} 神戸大学大学院工学研究科, 神戸市
Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe-shi, 657-8501 Japan
^{†2} (株) スペースタイムエンジニアリング, 東京都
Space-Time Engineering Japan, Inc., Tokyo, 110-0005 Japan
^{†3} カリフォルニア大学ロサンゼルス校, カリフォルニア州
University of California, Los Angeles, CA, 90095 USA

*1 以後、ネットワークシミュレータを単にシミュレータと呼ぶ。
*2 その他、ライセンス料やサポート体制なども重要な項目であるが、ここでは技術的な点に議論を絞ることにする。

加させるため実用的な時間内で意味のあるシミュレーション結果を得ることが難しくなる。一方、あまりにも簡略化したモデルを用いるとシミュレーション結果の信憑性が失われる可能性がある。したがって、ライブラリとして実装されているモデルの忠実性について注意を払う必要がある。

次に現実的なシナリオといったときに、まず仮定できるネットワークの規模が挙げられる。例えば、ノード数が 100 のシナリオで得られた結論がノード数 1,000 の場合に成立するとは必ずしもいえない。つまり現実的な環境に近いノード数での性能評価を行いたい場合には、ネットワークシミュレータのスケラビリティが重要になってくる。更には、Web ブラウジングしているユーザはレスポンスが悪いと別のページを見に行くかもしれず、トラフィックはネットワークの状態と相互作用している。このためユーザ行動を取り込んだトラフィックモデル（ユーザモデル）が必要になるかもしれない。更にシナリオとモデルの関係についても指摘しておきたい。例えば、障害物がない平原のような環境で端末がランダムに移動するというシナリオで得られた結論が、必ずしもビルが立ち並ぶ都市環境で成り立つとはいえない。建物を考慮した電波伝搬モデルが必要であるし、建物・地形情報をもとに端末を移動させるシナリオの構築が必要になる。このように、使用できるモデルにより想定可能なシナリオが制約を受けるという点でこれらは不可分な関係にある。

② 実世界との連携

よりユーザに近い評価尺度でもってシステムの良し悪しを議論する必要性から、ユーザがどう感じるかといったユーザレベルのサービス品質（QoE: Quality of Experience）が新たな評価指標となりつつある。このような評価を可能とするには、今後、実画像端末とシミュレータとを協調させて、ネットワーク内の QoS（Quality of Service）制御がユーザの主観評価にどのような影響を及ぼすのかを分析するハイブリッドシミュレーションがますます重要になると考えられる。

③ モデル開発の容易性

モデル開発には、OPNET [1], [2] のように GUI (Graphical User Interface) 上で開発する方法や ns-2 [3], QualNet [4], Scenargie [5] のようにエディタでプログラミングする方法がある。また使われている言語についても注意を払う必要がある。これらは慣れや好みの問題といえはそれまでだが、ユーザのシミュレータへの取付きやすさを左右する。ユーザ自身が考案したプロトコルの評価を行う場合、そのモデルのシミュレータへの実装が見通し良く行えることが重要である。モデ

ルのコードが公開されている場合は、シミュレータに組み込まれているライブラリモデルを参考にモデル開発を考えると考えられることから、ライブラリモデルのプログラムコードの可読性や設計ポリシーにも注意を払わなければならない。

④ 統計処理の信頼性

シミュレーション結果として得られる評価指標（スループットや遅延など）がどのような統計処理を経て得られたものかについて注意を払う必要がある。例えば、一般にシミュレートされる通信システムが定常状態に入るまでは標本（例えば、あるパケットの遅延）を統計処理の対象に含めるべきではない。一般的に統計処理はプロトコルモデルに埋め込まれているが、プロトコルモデルのソースコードが公開されていれば、ユーザ自身が統計処理の方法を確認できるし、必要に応じて改修することができる。

⑤ 性能評価作業の効率化

ネットワークシステムが複雑化しており、比較的簡単なシナリオでシステム評価を行う場合にも膨大な数のシステムのパラメータ設定を行う必要があるなど、シミュレーションシナリオを作る作業の負荷が増大しており、シミュレーションのための前準備により多くの時間を要するようになってきている。また、多くのシステムパラメータを変更しながら多数の実験を行った場合は得られたシミュレーション結果の管理が大変になる。また、あるプロトコルパラメータを変えたシミュレーション実験の結果を即座に確かめたり、プロトコルの動作が目視で確認できたりすれば、結果の分析やプロトコル動作検証に有用である。

さて上記の項目を、モデル、シミュレーションエンジン、入出力と関連付けると、項目 1, 3, 4 はモデルに、項目 1, 2 はシミュレーションエンジンに、項目 4, 5 はシミュレータへの入出力に関連していることに注意されたい。本稿では、上記の観点を踏まえ、商用ネットワークシミュレータである QualNet [4] と Scenargie [5] の特徴について解説する^{*3}。

両シミュレータとも基本設計から並列処理による高速化を念頭に置いて設計されている点に特徴がある。実世界の表現能力を高めたり、実世界との連携を可能にしたりするためには、シミュレーションエンジンに高い処理能力が要求されることから、この並列化処理技術が両シミュレータの強みとなっている^{*4}。なお、先発の QualNet は、分散シミュレーション（つ

*3 両シミュレータとも著者の高井が基本設計を手掛けており、ともに日本人の手により開発されたシミュレータといっても過言ではない。

*4 ns-2 や OPNET にも並列処理への拡張がなされているが、基本設計から並列処理が組み込まれていたわけではない。

まり非共有メモリ) による並列計算を実現しており、後発の Scenargie では、近年のマルチコア CPU の普及を念頭に共有メモリを用いたマルチスレッドによる並列化を実現している。

また Scenargie は、実世界の表現能力を向上させることや性能評価作業の効率を改善するために、システム評価のための地理情報と連携した移動モデルや電波伝搬モデルを使用したシミュレーションへの対応、シナリオ構築及び評価結果の集計・分析の効率化を念頭に開発が進められている。Scenargie は、単体での使用はもちろんのこと、QualNet と連携して使用するための拡張機能が提供されている。例えば、電波伝搬モデルや移動モデルは Scenargie で処理を行い、通信システムモデルは QualNet で処理を行うといったことが可能である。これは、QualNet と Scenargie が、ともに離散事象シミュレータであるため、シミュレータ間でイベントメッセージをやり取りすることで、イベントごとに任意のシミュレータで処理を行うことができるからである。このようなしくみによって、従来の QualNet で開発したモデルの資産を活用したまま Scenargie の新しい機能を活用することができる。

QualNet は、現在、国内では 35 企業、110 大学で利用されている^{*5}。一方、Scenargie は 2008 年に初版がリリースされたばかりであり、ユーザ数は少ない。しかし、その特徴から今後の動向が注目される商用シミュレータである。

以下、2 章では、QualNet の開発の歴史（ベースとなっている並列処理ライブラリ PARSEC (Parallel Simulation Environment for Complex Systems) や QualNet の前身である GloMoSim の並列処理高速化技術など）や特徴について解説する。3 章では Scenargie のねらい、特徴、今後の方向性について述べる。

2. QualNet

QualNet は、UCLA の並列計算研究室(Parallel Computing Laboratory) で開発された GloMoSim [6] をベースとし、SNT (Scalable Network Technologies, Inc.) 社が開発を行っている商用ネットワークシミュレータである。GloMoSim (Global Mobile Information Systems Simulator)、QualNet とともに、UCLA 並列計算研究室で開発された並列処理ライブラリ PARSEC [7] をも

とに開発されており、並列処理による高速化を念頭に置いて設計されている。このため、数千ノードからなるシミュレーションを高速に実行することができる^{*6}。また、GUI によるシミュレーション開発・実行・表示環境が提供されているので、システム制御パラメータを変更してシミュレーションを実行し、その結果としてのパケット送受信の様子をアニメーションにより確認することが容易である^{*7}。また、プロトコルモデルはソースコードを含めて提供され、そのソースコードも C ライクな C++ で記述されていることから、C 言語に慣れたユーザにとっては既存のモデルを改変して新しいプロトコルを QualNet に組み込むことが容易である。本章では、まず背景として PARSEC、GloMoSim について概説し、その後、QualNet の特徴を述べる。

2.1 基盤技術

(1) PARSEC

PARSEC は、並列離散事象シミュレーションのために UCLA 並列計算研究室で開発された並列処理ライブラリであり、後述する GloMoSim はこの PARSEC を使って実装されている。

一般に並列離散事象シミュレーションは論理プロセスの集合としてプログラミングされる。論理プロセスは複数の物理プロセス(ここでは物理現象をモデル化したもの)をシミュレートしつつ、他の物理プロセスに影響を及ぼすイベント(事象)をその発生時刻(タイムスタンプ)を含むメッセージによりほかの論理プロセスへ通知する(メッセージ送信する)。メッセージを受け取った論理プロセスは、自身のイベントと併せて矛盾のない順序で物理プロセスをシミュレートする。この並列離散事象シミュレーションにおいて重要となるのが、論理プロセスをどのように同期させるのか(同期アルゴリズム)ということと、そもそもどのように物理プロセスを論理プロセスに割り当てるのか(パーティショニング)ということである[8]。

同期アルゴリズムは、複数の論理プロセスがシミュレートする物理プロセスが全体として矛盾なく処理されることを保証するもので、シミュレーション時刻を進める前に各論理プロセスの状態に矛盾が起きないことを保証していく保守的方式、シミュレーション時刻を進めるだけ進め矛盾が生じた場合は時刻を巻き戻して(ロールバック)シミュレーションをし直す楽

* 6 QualNet は GloMoSim をベースとしているが、商用化に当たり一般化が図られており、GloMoSim と同じスケラビリティは達成できない。

* 7 ns-2 にはシミュレーション実行結果をアニメーション表示する機能として nam(Network Animator)がある。しかし、nam を介してシミュレーション実行を行ったりプロトコル開発を行ったりすることはできない。

* 5 2008 年 11 月 12 日現在 QualNet 国内代理店・構造計画研究所調べ。

観的方式、両者を組み合わせたハイブリッド方式などがある。PARSEC には、例えば保守的方式として論理プロセス間で保証時刻更新のために空（ヌル）メッセージを送信し合うヌルメッセージ法、全論理プロセスがいったんシミュレーションを中断し（バリヤ同期）、保証時刻を一斉に更新する同期法や楽観的方式の最も基本的な方式である TimeWarp に基づく方式など、複数の同期アルゴリズムが実装されている[7]。ヌルメッセージ法は論理プロセス間に相互依存がある場合、同期法は論理プロセス数が多い場合、TimeWarp 法はロールバックに必要な状態変数の数やメモリ使用量が多い場合にそれぞれ非効率になることが知られているので、最適な同期アルゴリズムを使ったシミュレーション実行が効率的な並列シミュレーションにおいて大変重要である。

次に PARSEC の実装について述べる。PARSEC は C 言語を拡張した論理プロセスの生成、初期化、メッセージの授受などの記述ができる言語と、それをサポートする実行ライブラリから構成される。論理プロセスの記述は同期アルゴリズムと独立した形で記述されるので、複数の同期アルゴリズムを利用して、そのシミュレーション実行に最適な同期アルゴリズムを特定することも可能である。

(2) GloMoSim

GloMoSim は、軍事シナリオのもとで数十万のモバイルノードからなるネットワークを高速にシミュレーションすることを目指して、米国防高等研究計画局 (DARPA) の支援のもと UCLA 並列計算研究室において開発されたネットワークシミュレータである。プロジェクトの趣旨から MANET (Mobile Ad-hoc Networks) が主なターゲットとなっている。許容できる実行時間内に大規模ネットワークに対するシミュレーション実行結果を得るため、GloMoSim は PARSEC をベースに開発されている。

以下に GloMoSim の特徴を述べる[6], [9] ~ [11]。

- a) **OSI 7 階層モデルに類似した階層構造設計**：ライブラリとしてレイヤ間 API (Application Program Interface) が提供されている。この API を介して各階層のプロトコルが選択され、実行されるしくみになっているため、ある階層で用いるプロトコルを変更することや、新しいプロトコルを追加したりすることが容易である（モデル開発の容易性）。例えば、GloMoSim に実装されている TCP (Transmission Control Protocol) は、FreeBSD (Free Berkeley Software Distribution) から移植されている。
- b) **ノード集約による論理プロセス分割**：一般にネットワー

クシミュレーションでは、プロトコル階層間でパケットの受渡しが頻繁に発生する。そこで GloMoSim では、一つの論理プロセスがある領域内の複数のノードをシミュレートする方法を採用している。この方針に従えば、ある論理プロセスが管理するノードのうちエッジにあるものが送信する無線パケットのみが隣接する領域に伝搬するとみなすことができるため、論理プロセス間の同期オーバーヘッドを抑えることが可能である。ただし、考慮すべき電波伝搬の範囲 (Propagation limit) がシミュレーション結果の信憑性に影響することから、Propagation limit は慎重に検討されなければならない [11]。なお、ノードが領域の境界を超えて移動する場合は、その境界の論理プロセス間でシミュレートするノードの移し換えが行われる。この頻度はパケット送信が行われる頻度に比べて少なく、このためのオーバーヘッドは無視できるほど小さい。

- c) **プロトコルモデルからの保証時刻予測**：論理プロセス間同期においては、ある論理プロセスの処理の正当性が先行論理プロセスに影響を受けることなく保証される期間をいかに予測するかが重要となる。この保証時刻の予測精度が高いほど並列処理の効率は改善される。GloMoSim ではプロトコル動作から保証時刻を予想することで並列処理の効率を上げている。例えば、IEEE 802.11 標準の MAC (Media Access Control) 層では、フレーム受信から送信に切り換わるまでの遅延が規定されている。つまり、この規定に準拠している MAC プロトコルモデルでは、この切換え時間の間にフレーム送信は行われない。またあるノードはフレーム受信中にはフレーム送信できない。この時間内は、ほかの論理プロセスに影響を及ぼさないことから、ほかの論理プロセスの処理は保証される。

- d) **詳細な物理層及び MAC 層モデル**：GloMoSim では、無線ネットワークをターゲットにしており、物理層や MAC 層のモデル化が可能な限り詳細に行われている。

GloMoSim におけるパケット受信モデルとして SNRT (Signal to Noise Ratio Threshold) モデルと BER (Bit Error Rate) モデルをサポートしている。SNRT モデルでは、あるフレームが誤りなく受信されるか否かはそのフレーム受信時に SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) がしきい値を超えるかどうかで判断する。BER モデルでは、変調方式に対応した SNR (Signal to Noise Ratio) 表 (SNR に対するビット誤り率) を参照す

ることでフレーム受信中にビット誤りが発生するかどうかで判定を行っている。

図1はあるフレーム受信中には他の三つのフレーム送信が干渉している場合を示している。ここで、 P_s を希望フレームの受信電力、 P_{I_i} をフレーム*i*からの干渉電力、 P_N を受信機の内部雑音電力とする。また図に示されるように、希望フレーム受信中にSINRが時刻 T_1 から T_6 までの間に5回変化しているとする。GloMoSimでは、時刻 T_3 におけるSINRを次式により算出する。

$$\text{SINR} = \frac{P_s}{P_{I1} + P_{I2} + P_{I3} + P_N}$$

つまり、干渉電力を積算してSINRの計算を行っている。GloMoSimでは、SNRTモデル並びにBERモデルともにこの5回のSINRの変化に追従してフレーム受信の判定を行っている。

一方、ns-2では、SNRTモデルのみをサポートしており、また時刻 T_3 におけるSINRを次式により算出している*⁸。

$$\text{SINR} = \frac{P_s}{P_{I3}}$$

ここでは、時刻 T_3 以降最も長く続く干渉フレームの干渉電力のみが考慮されてSINRが計算される。このためns-2では干渉電力を小さく見積もる傾向にある。

図1 希望フレーム受信中のSINR変化

2.2 特徴

QualNetはGloMoSimを商用版として完成度を高めたものであり、豊富なモデルライブラリが提供されている。またGUIによるシナリオ構築・実行・表示分析環境が提供されている[4], [12]。

a) モデルライブラリ：GloMoSimがMANETを主要ター

ゲットとしていたことから、AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), DSR (Dynamic Source Routing), OLSR (Optimized Link State Routing), OLSRv2 (OLSR version 2), ZRP (Zone Routing Protocol), DYMO (Dynamic MANET On-demand Protocol) などのMANET経路制御方式プロトコルのモデルが充実している。また、無線系物理層及びMAC層ではIEEE802.11 (a/b/g/e/s), IEEE802.16 (d/e) (WiMAX), IEEE802.15.4 (Zigbee) などのモデルが提供されている。また、IEEE 802.3 (Gigabit Ethernet など), ATM (Asynchronous Transfer Mode) など有線系のプロトコルモデルも含まれている。

b) ハイブリッドシミュレーション：実システムとシミュレーションを協調させるハイブリッドシミュレーション[13]～[15]が可能である。このハイブリッドシミュレーションは、ns-2やOPNETでも実行可能である。ハイブリッドシミュレーションはQoSとQoEの関係を評価したいような場合に有効である。図2は、送受信端末がビデオ転送を行う実システムであり、途中のネットワークをQualNetによりシミュレーションしている場合を示している。QualNetはその高速性を生かし、例えば図2におけるビデオサーバ自身をQualNet内でシミュレーションするといったことも可能である。なお、著者らの知る限りにおいては、ns-2ではこのようなハイブリッドシミュレーションを行っている例はない。

c) GUIによるシナリオ作成・実行・分析環境：QualNetでは、統合GUI環境が提供されている。この統合環境はシナリオデザイナー、アニメータ、パケットトレーサ、アナラ

図2 ハイブリッドシミュレーションの概念

* 8 2009年1月12日時点で最新のns-2 ver. 2.33から追加された802.11extというモデルを使えばGloMoSimと同様のSINRの計算を行うことができる。しかし、実際は従来のモデルが使用されていることが多い。

イザから構成されている^{*9}。シナリオデザイナーでは、ノード配置、トラフィック特性を含む各階層プロトコルのシステムパラメータなどを GUI で設定し、シミュレーションを実行（バッチ実行を含む）することができる（図 3）。アニメータは、ns-2 の nam と同様の機能としてシミュレーション実行過程を、

図 3 QualNet シナリオデザイナー

図 4 QualNet アニメータ

図 5 QualNet パケットトレーサ

* 9 バージョン 3 系まではプロトコルを状態遷移図として記述しながらプログラミングを進めることができるプロトコルデザイナーが提供されていたが、この機能はバージョン 4 からなくなっている。

実行後も含めてグラフィカルに表示することができるツールである（図 4）。パケットトレーサは、プロトコルスタック間を通過するパケットを分析することに利用できる（図 5）。アニメータもパケットトレーサもプロトコルの動作検証やデバッグに利用できる。アナライザは、スループットや遅延、パケット受信率などの統計情報を表示する機能であり、シミュレーション結果を手早く確認するのに便利である（図 6）。

d) フォーラムによるユーザサポート：ユーザサポートとして、QualNet フォーラムが開発元の SNT 社と日本代理店の構造計画研究所のそれぞれで運用されている。フォーラム内の記事を検索して問題を解決できる場合もあるし、フォーラムで質問することで他ユーザや SNT 社や構造計画研究所のエンジニアから必ずとはいえないまでも回答を得ることができる（図 7）。

e) センサネットワーク用フレームワーク sQualNet [16]：QualNet は IP（Internet Protocol）プロトコルの階層を意識した設計となっている。一方、センサネットワー

図 6 QualNet アナライザ

図 7 QualNet ユーザフォーラム

クでは、必ずしも IP プロトコル階層に従うということはない。sQualNet は、UCLA のネットワーク組込研究室 (Networked and Embedded Laboratory) と並列計算研究室により開発されたセンサネットワーク用フレームワークであり、バッテリーモデル、プロセッサ消費電力モデル (実際は完了していない)、地理的近接性を考慮したトラヒック発生モデル、経路制御プロトコルモデル (Directed Diffusion) や MAC プロトコルモデル (S-MAC) を提供している。なお、sQualNet は QualNet バージョン 3.8 までで利用可能であり、また現在開発が止まっている[17]。

2.3 QualNet Tips

本節では QualNet のユーザとして注意すべき点として、統計処理に関する問題点を指摘する。

QualNet に限ったことではないが、シミュレーション結果として得られるスループットや遅延がどのような統計処理を経て得られたものかについて注意を払う必要がある。例えば、QualNet における CBR (Constant Bit Rate) トラヒックモデルでのスループット計算方法は次のようになっている。QualNet における CBR トラヒックモデルではクライアントからサーバにパケットが送信される。CBR サーバとなるノードに最初のパケットが受信された時点でサーバが生成され、セッション開始時刻が設定されるとともにスループットの計測が開始される。サーバ側でのセッション終了時刻は、最終パケット受信時かシミュレーション終了時刻のうちの早いほうの時刻で決定される。サーバ側で計測されるスループットは、サーバでのセッション終了時刻からサーバでのセッション開始時刻を引いた時間でこの間に到着した総パケットデータ量を割ることで計算されている。このため例えば、100 パケットが CBR クライアントから送信されたとして、最初の 98 個が受信されず、最後の 2 パケットのみが受信されると、その 2 パケットの受信間隔によってスループットが計算される。このため、たまたまこの 2 個のパケットが短い間隔で到着すると、シミュレーション結果としてのスループットが見掛け上大きく出力される。QualNet ではプログラムソースが公開されているので、統計量がどのように算出されているのか確認することをお勧めする。

3. Scenargie

本章では、前述した GloMoSim 及び QualNet の開発

者らが中心になって新たに開発した総合シミュレーションフレームワーク「Scenargie™」について解説する。Scenargie は、Scenario Generation and Management Framework for In-Depth System Analysis and Evaluation の略であり、シミュレーションによるシステムの設計や分析・評価を行うためのツールとして、シナリオ構築環境やネットワークシミュレーション環境などが提供されている。本章では、Scenargie が生まれた背景を概観した後、Scenargie の特徴を技術的な視点と利用者としての視点から解説する。更に、今後のネットワークシミュレータに求められる機能について述べる。

3.1 背景

Scenargie は、主に a) システム評価のための地理情報と連携した移動モデルや電波伝搬モデルを使用したシミュレーションへの対応、b) シナリオ構築及び評価結果の集計・分析の効率化の二つの背景を踏まえて開発が進められた。以下、それぞれについて解説する。

a) 地理情報と連携した移動モデルや電波伝搬モデルを使用したシミュレーションへの対応：近年のネットワーク研究の動向から、システム評価ツールに対する新たなニーズが出てきている。

まず、従来のネットワーク研究は、特定レイヤのプロトコルの最適化など、一つのレイヤに閉じた形で行われることが多かった。そのため、ネットワークシミュレータを用いた性能評価でも、特定のレイヤの性能評価に終始していた。しかしながら、特定のレイヤでの最適化が必ずしもシステム全体の性能を改善するとは限らないため、近年は特定のレイヤに限定せず、クロスレイヤインタラクションを考慮したシステムの最適化及びそのための性能評価が行われている。よって、無線アクセス技術の研究開発であっても物理レイヤや MAC レイヤに限らず電波伝搬からアプリケーションまで総合的にシステムをシミュレーションする必要がある。

更に、性能評価指標としても単に遅延やスループットといったネットワークレベルでの指標ではなく、通信サービスを利用しているユーザがどう感じるかといったユーザレベルのサービス品質 (QoE) が新たな評価指標となりつつある。このようなニーズに対応するためには、ネットワークシミュレータとしてユーザの行動を模擬する必要がある。更に、ユーザによってその通信行動には特徴があり [18]、ユーザを画一的に扱うことは QoE の評価に大

きな影響を与えてしまうため [19], 個々のユーザの行動を模擬する必要がある。

また, システムの性能評価において, 建物や道路, 地形といった地理的な環境を考慮することが重要である。電波伝搬の評価においては建物や地形といった地理的な影響が多岐であり, それらを考慮していない評価は非現実的にならざるを得ない。特に, 近年の無線アクセス技術の主流となりつつある OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) など広帯域無線通信の評価においては, シャドウイングやフェージングの影響を適切に扱うために, 地理情報を反映させることが必須となる。同時に, 歩行者や車といった移動体のモビリティも実世界での現象を再現するためには, 道路や地形を考慮する必要がある。

このように, 従来は「ネットワークシステム」のみが性能評価の対象であったが, ネットワークシステムを利用する「ユーザ」やユーザやネットワークシステムの挙動に影響を与える地理的な「環境」を考慮することが求められている [20]。

b) シナリオ構築及び評価結果の集計・分析の効率化: 無線アクセス技術の高度化やサービスの多様化に伴いネットワークシステムは複雑化の一途をたどっている。同時に, それらを実評価するネットワークシミュレータも, 実システムを忠実に再現するためシステムモデルが複雑化している。そのため, 比較的簡単なシナリオでのシステム評価を行う場合にも膨大な数のシステムのパラメータ設定を行う必要があるなど, シミュレーションシナリオを作る作業の負荷が増大しており, シミュレーションのための準備により多くの時間を要するようになってきている。

また, ネットワークシミュレータの高機能化や, 計算機サーバやデータベース技術の高性能化, 低価格化によって, 以前にも増して大量のシミュレーション結果 (ログデータ) を出力し保存することが容易になった。ネットワークシミュレータは, 実システムでは計測不可能な詳細なデータを計測することが可能であり, 大規模ネットワークにおける個々のパケットの詳細な動きに関するデータなどを取得することができる。しかしながら, このような大量のデータを取得したとしても, それらのデータから意味のある有益な情報を効率良く見いだすことが肝要である。現実には, 取得できるデータが増えるにつれてそのデータの集計・分析にかかる負荷が増大してしまう場合が

多い。このように, 以前にも増してシナリオ構築などのシミュレーションの準備や, 評価結果の集計・分析などのシミュレーションの後処理に, より多くの手間がかかってしまっている。

本来, ネットワークの研究者, 技術者にとっては, 新たなアルゴリズムの考案や評価結果の考察に多くの時間を使うことが望まれ, 評価のための準備や後処理にかかる時間は最小化する必要がある。つまり, システムの評価ツールは単に詳細なシミュレーション結果を出力するだけでなく, シナリオ構築や評価結果の集計・分析を効率的に行えるしくみを提供することが極めて重要である。

3.2 特徴

本節では, 3.1 節で述べた背景を踏まえて開発された新しいシミュレータ「Scenargie^{TM}」について, その特徴を技術的な視点と利用者としての視点から解説する。

(1) Scenargie の主な特徴

Scenargie は, システム評価のための新たなニーズへの対応として取り上げた「ユーザ」及び「環境」といったシミュレーション評価対象の拡大に対して, GIS (Geographical Information System) 技術とマルチエージェントシミュレーション技術を応用することで目的を達成している [21]。また, シナリオ構築及び評価結果の集計・分析の効率化のために, GUI によるシナリオ構築環境やデータベースとの連携によって目的を実現している [22]。以下に, 主な特徴についてトピックごと解説する。

a) GIS: 3.1 節で述べたように, ユーザ行動や電波伝搬シミュレーションをより高精度で行うためには, 建物や道路, 地形といった GIS 情報を考慮することが重要である。しかしながら, 現状のネットワークシミュレータでは, GIS 情報を適切に利用することが難しい。Scenargie では, シェープファイル [23] として地理情報をシミュレーションシナリオとして入力できるしくみがあり, 道路に沿った歩行者や車の移動, 建物や地形を考慮した電波伝搬のシミュレーションを行うことができる (図 8)。これにより, 現実世界により近い電波伝搬やユーザのモビリティを仮定したシミュレーション評価を行うことができる。例えば, セルエッジでのハンドオーバー処理の評価や置局設計の検討を行うことができる。

b) マルチエージェントシミュレーション技術: マルチエー

図8 歩行者の移動シミュレーション(10,000 ノード)
地図は、国土地理院発行の数値地図 2500 (空間データ
基盤) を使用

ジェントシミュレーションは、複数のエージェントが特定の設定ルールに従い自律的に行動し、相互に作用した結果としてシステム全体の挙動をシミュレーションする方法である。実際のユーザの歩行や通信といった行動は、周りの環境に応じて動的に変わることから、マルチエージェントシミュレーションのしくみを応用することで、現実的なユーザ行動を模擬することができる。例えば、通信システムがふくそうしている場合にユーザが何度も再呼する、混雑している道路でユーザの歩行速度が低下するといった状況を表現することができる。

既存のネットワークシミュレータでも、通信ノードをエージェントと見立てることで、マルチエージェントシミュレーションの考えが反映されているとみなすことができる。しかしながら、各ノードのパラメータやトラフィックの発生情報などは、シミュレーションシナリオとしてあらかじめシミュレーション実行前に静的に与えられており、シミュレーション中に状況に応じて動的にユーザの行動が変わったりトラフィックの発生が変わったりするような状況を再現することは難しい。

Scenargie では、マルチエージェントシミュレーションのしくみを取り入れることで、動的なアプリケーションの発生など現実的なユーザ行動のシミュレーションを実現している。更に、通信ノード(ユーザなど)をシミュレーション中に動的に生成または消滅させることも可能である。その結果、ユーザレベルのサービス品質の評価や、より現実的なユーザ行動を反映させたシミュレーション評価を行うことができる。

c) シナリオ構築環境：研究者、技術者にとってシミュレ

ーション評価のためのシミュレーションシナリオの作成は、多くの労力を必要とする。そのため、より簡単に短時間でシナリオが作れるようなシナリオ構築環境が望まれる。商用のほかのシミュレータと同様に、Scenargie でもウィザード形式のシナリオ作成機能が提供されている。また、通信ノードに対し任意のパラメータを持たせることができるほか、道路や建物といった地理情報も Scenargie 上で作成しシミュレーションシナリオを構築することが可能である。図9は、WiMAX システムのシミュレーションシナリオ作成イメージを示している。このようなしくみによって、従来シナリオ作成に要していた時間を大幅に削減することが可能となる。

図9 19セル基地局配置による WiMAX システムのシミュレーションシナリオ作成の例

d) データベースとの連携機能：3.1 節で述べたように、評価対象システムの複雑化やシミュレータの高度化に伴い、シミュレータで計測したデータのログは膨大になり、その集計や分析に多くの時間がかかることが多い。この問題を解決するために、Scenargie では、外部のデータベース(例えば、PostgreSQL)と連携するしくみが提供されている。このしくみによって、例えば個々のパケットの挙動や電波伝搬環境の時系列的な変化などの詳細なログをテキストデータとして出力するのではなく、データベースに出力し保存することが可能となっている。また、シミュレーション結果を分析する際にも、データベースを利用することで、高度なデータ分析を効率的に行うことができる。その結果、シミュレーション結果の集計や分析をより短時間で行うことができる。

(2) その他の特徴

Scenargie では、このほかにも既存のネットワークシミュレータの持つ機能や性能を向上させるための多くの工夫が施されている。以下に、その幾つかを紹介する。

a) 並列離散事象シミュレーションによる高速化：並列シ

シミュレーション技術は、マルチコアプロセッサ環境において複雑なシステムレベルシミュレーションをより高速に実行することを可能にする。これは、システムモデルの簡略化による高速化ではないためシミュレーション結果の精度には一切影響を与えない。つまり、シミュレーション精度を維持したまま、コア(プロセッサ)の数に応じてシミュレーションの実行速度を高速化することができる。これは、複雑化するシステムの評価には非常に有効であり、標準化中の技術や実用に向けた評価を効率的に行うのに適している。

既存のシミュレータの幾つかは、MPI(Message-Passing Interface)などを使いマルチプロセスによって非共有メモリによる並列計算を実現している。しかし、この方法はプロセス間を同期するためのオーバーヘッドが大きく並列計算による効果にも限界があった。一方、Scenargie では、当初から共有メモリを用いたマルチスレッドによる並列化を実現している。これは、近年のマルチコアプロセッサ技術の発展などのサーバ環境に適合しており、マルチコアプロセッサの性能を最大限生かすことができ、シミュレーションに関わる研究開発活動の生産性を大幅に改善することができる。

b) 電波伝搬シミュレーションの高精度化: 無線アクセスシステムの評価には、電波伝搬のシミュレーションを適切に考慮する必要がある。有線ネットワークのシミュレータから発展した多くの既存シミュレータは電波伝搬のシミュレーションが貧弱で、極端な簡素化が行われていることが多い。また、無線アクセス技術に特化して研究開発を行っている研究者や技術者は、詳細な電波伝搬シ

ミュレーションを行っているもののリンクレベルでの評価が多くシステムレベルでの評価はあまり行われていない。Scenargie では、電波伝搬シミュレーション技術として定評のある米国 Remcom 社との技術提携により高精度な電波伝搬シミュレーションをシステムレベルでの評価に適用することに成功している。更に、(1) a) 項で述べた GIS 技術と連携することで建物や地形といった GIS 情報を考慮したより現実的な電波伝搬シミュレーションを実現している(図 10)。

c) 通信システムモデルの拡張性: 既存のネットワークシミュレータは、IEEE 802.11 や IEEE 802.16, GSM (Global System for Mobile Communications) や UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) といったさまざまな通信システムのモデルライブラリが提供され、ネットワークの研究者や技術者はそれらを利用し、さまざまな通信システムを仮定した評価を行うことができる。しかし、現実には既存の通信システムのモデルを利用するだけでなく、研究者自身が新たに考案したプロトコルの性能評価など独自のしくみを評価する場合が多い。その場合、プロトコルなどの独自のしくみをモデルの中に組み込む必要がある。この場合、独自のモデルをいかに容易に実装できるかという点はネットワークシミュレータに対する重要な要求の一つである。しかしながら、既存のネットワークシミュレータは、C++ 言語を利用するなどオブジェクト指向によるモデルの記述が行われているものの、必ずしもコードの可読性は高くなく、モデルの改変にはシミュレータ自体の習熟やモデルのソースコードの理解が必要である。また、モデルによっては、ソースコードではなくバイナリとして提供されることもあり、利用者としてその内部構造を理解することができないといった問題もある。

Scenargie では、通信システムモデルの開発のしやすさを実現するために、すべての通信システムモデルがソースコードの形で提供されている。これは、研究者、技術者にとって、非常に都合が良く、オリジナルのモデルの開発や既存のモデルの拡張が容易になる。更に、通信システムのモデルをオープンにすることでその信憑性、妥当性を担保することにもつながっている。

また、Scenargie の通信システムモデル及びシミュレーションエンジンは、C++ でスクラッチから開発されており、C++ 言語標準に忠実に沿ったソースコードである。そのため、ソースコードの可読性や拡張性に優れており、研

図 10 San Diego 市街地における Pathloss 計算結果

究者や技術者が提案する新たなプロトコルなどの実装が行いやすい。

3.3 今後の方向性

2章や前節で QualNet や Scenargie の特徴について述べたが、ネットワークシステムに関わる研究開発の効率化や高度化には、システム評価ツールの更なる発展が求められる。シミュレーションによるシステムの性能評価ツールに今後求められる機能として三つのトピックを取り上げ、今後の方向性を解説する。

a) **評価シナリオの標準化**: 多くの研究者は、提案するプロトコルなどの技術を独自のシミュレーションシナリオでその有効性を示すことが多い。性能評価結果は、そのシミュレーションシナリオに強く依存するため、提案する技術の効果が最も有効に働くシナリオを意図的に作成することも可能である。このような問題を解決する方法の一つとして、シミュレーションシナリオを含むシステムの評価手法を共通化することが考えられる。統一された評価手法によってその性能を評価することで、公平で客観的な評価が可能となる。既に、IMT-Advanced や IEEE802.16m などでは、システムの評価手法を統一化する動きがある [24]。このような統一化された評価手法をシミュレータに取り込むことも今後重要であると考ええる。

b) **QoE の評価**: また、前節で述べたように、現在の複雑なネットワークシステムにおいて特定レイヤの最適化だけでは、システム全体の性能向上に寄与できるとは限らない。特に、最終的にユーザがどう感じるかといったユーザレベルのサービス品質 (QoE) の評価を行うことが今後重要になってくると考えられる。そのためには、シミュレータにネットワークシステムだけでなくユーザの行動やユーザの知覚する品質を定量化するしくみを考慮することが求められる。

c) **実システムとの連携**: 商用シミュレータの幾つかは、シミュレータと実機とを連携させて動作させるしくみがある。例えば、ネットワーク部分をシミュレータで模擬し、実機の端末に動画を表示させるといったことができる。このようなしくみは、シミュレータだけでは困難な主観評価などを効率的に行うための有効手段だと考えられる。ただ、そのためには、シミュレーション自体は実時間以下で実行する必要があるが、現状では、小規模のシステムをシミュレーションするのが限界で、複雑なシステムを実時間で

下で実行することは難しい。そのためにシミュレータ自体の性能を向上させ、より一層の高速化が必要となる。

4. む す び

本稿では、商用シミュレータである QualNet と Scenargie について、その開発に至る背景や特徴を解説した。QualNet, Scenargie とともに並列処理を考慮して基本設計がなされており、大規模シミュレーションを高速に処理できる。QualNet は既に一定の地位を確立しており、また豊富なモデルライブラリを有している。一方、Scenargie はまだ産声をあげたばかりでサポートしているモデルライブラリも限定されているものの、QualNet との連携により QualNet のモデルを利用できることや、シナリオ構築及び評価結果の集計・分析の利便性が高く、今後の発展が期待できる。

謝 辞

本稿を執筆するに当たり、QualNet 日本代理店の構造計画研究所に情報を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- [1] <http://www.opnet.com>
- [2] 山田博司, “OPNET を用いたネットワークプロトコルの性能評価について,” 信学技報, NS 2008-5, no.31, pp.25-30, May 2008.
- [3] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/CHANGES.html>
- [4] <http://www.scalable-networks.com/>
- [5] <http://www.spacetime-eng.com/>
- [6] X. Zeng, R. Bagrodia, and M. Gerla, “GloMoSim: A library for parallel simulation of large-scale networks,” Proc. 12th Workshop on Parallel and Distributed Simulation (PADS), pp.154-161, May 1998.
- [7] R. Bagrodia, R. Meyer, M. Takai, Y. -A. Chen, X. Zeng, J. Martin, and H. Y. Song, “PARSEC: A parallel simulation environment for complex systems,” IEEE Comput., vol. 31, no. 10, pp. 77-85, Oct. 1998.
- [8] R. M. Fujimoto, “Parallel discrete event simulation,” Commun. ACM, vol.33 no.10, pp.30-53, Oct. 1990.
- [9] L. Bajaj, M. Takai, R. Ahuja, and R. Bagrodia, “Simulation of large-scale heterogeneous communication systems,” Proc. IEEE MILCOM 1999, no. 1, pp. 1396-1400, Oct. 1999.
- [10] N. H. Vaidya, R. Bagrodia, and M. Takai, “Design and modelling of medium access control protocols for

wireless ad hoc networks,” Proc. MobiHoc 2002, Tutorial Presentation, June 2002.

- [11] Z. Ji, J. Zhou, M. Takai, J. Martin, and R. Bagrodia, “Optimizing parallel execution of detailed wireless network simulation,” Proc. 18th Workshop on Parallel and Distributed Simulation 2004, pp.162-169, May 2004.
- [12] <http://www4.kke.co.jp/qualnet/>
- [13] K. Fall, “Network emulation in the Vint/NS simulator,” Proc. 4th IEEE Symp. Comput. and Commun. (ISCC99), July 1999.
- [14] M. Takai, R. Bagrodia, M. Gerla, B. Daneshrad, M. Fitz, M. Srivastava, E. Belding-Royer, S. Krishnamurthy, M. Molle, P. Mohapatra, R. Rao, U. Mitra, C.-C. Shen, and J. Evans, “Scalable testbed for next-generation wireless networking technologies,” Proc. 1st Int. Conf. on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TRIDENTCOM’05), pp.162-171, Feb. 2005.
- [15] J. Zhou, Z. Ji, and R. Bagrodia, “TWINE: A hybrid emulation testbed for wireless networks and applications,” Proc. IEEE INFOCOM 2006, no.1, pp.1155-1167, April 2006.
- [16] M. Varshney and R. Bagrodia, “Detailed models for sensor network simulations and their impact on network performance,” Proc. 7th ACM Int. Symp. Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, pp.70-77, 2004.
- [17] <http://nesl.ee.ucla.edu/projects/squalnet/>
- [18] Y. Akinaga, S. Kaneda, N. Shinagawa, and A. Miura, “A proposal of mobile communication traffic forecasting method using time-series analysis for multivariate data,” Proc. IEEE Globecom 2005, pp. 253-258, Nov. 2005.
- [19] S. Kaneda, A. Hiromori, Y. Akinaga, N. Shinagawa, K. Sugiyama, and M. Takai, “Performance evaluation of network systems accounting for user behaviors,” Proc. IEEE Int. Conf. Commun. 2007, pp. 57-64, June 2007.
- [20] S. Kaneda, Y. Akinaga, N. Shinagawa, A. Miura, and M. Takai, “Integrated user and network simulation for traffic control by influencing user behavior,” Proc. 2nd ACM Int. Workshop on Performance Evaluation of Wireless ad hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks 2005 (PE-WASUN 2005), pp.99-105, Oct. 2005.
- [21] 大和田泰伯, 前野 誉, 高井峰生, “交通流シミュレーションと通信システムシミュレーションの融合,” 情報処理学会 DICOMO2008, pp.1606-1610, June 2008.
- [22] 大和田泰伯, 前野 誉, 金田 茂, 久永良介, 高井峰生, “Scenargie を用いた ITS シミュレーション,” 情報処理学会 DPS ワークショップ, Dec. 2008.
- [23] http://www.esrij.com/products/gis_data/shape/
- [24] IEEE 802 “IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD),” July 2008.

(平成 20 年 11 月 18 日受付, 平成 21 年 2 月 9 日再受付)

高木由美 (正員)

平元佐賀大・理工・電子工学卒。平 11-09 神戸大・工・教務職員。平 19-04 同大学院工学研究科助手, 現在に至る。MANET に関する研究に従事。

太田 能 (正員)

平 2 阪大・工・通信卒。平 4 同大学院工学研究科前期課程・通信工学専攻了。平 7 同研究科後期課程・通信工学専攻了。博士 (工学)。同年 04 群馬大・工・助手。平 8-10 徳島大・工・講師。平 13-03 同助教授。平 14-11 神戸大・工・助教授。平 15-03 から 1 年間マサチューセッツ大訪問研究員。平 16-04 神戸大学院・工准教授, 現在に至る。無線アクセス網, MANET に関する研究に従事。IPSJ, IEEE, ACM SIGCOMM 各会員。

金田 茂 (正員)

平 13 東工大・工・電気電子工学卒。平 15 同大学院理工学研究科集積システム専攻了。同年 04, (株) NTT ドコモ入社。同社総合研究所において, トラヒック制御, システム性能評価に関する研究開発に従事。平 20-07, (株) スペースタイムエンジニアリング入社。現在, 同社の主力製品 Scenargie の開発責任者として設計開発をリードするとともに, 無線ネットワークシステム及びシステム評価技術に関する研究開発に従事。

高井峰生 (正員)

平 4 早大・理工・電気卒。平 9 同大学院理工学研究科博士後期課程了。同年 05 カリフォルニア大ロサンゼルス校計算機科学科ポストドクトラルフェロー。同年 10 より同大上級開発研究員。平 11-07 より同大首席開発研究員, 現在に至る。平 20-04 より早大・理工学術院客員准教授兼任。並列・分散処理技術, 無線ネットワーク技術とシステムシミュレーションの研究に従事。平 13 より米国スケラブルネットワークテクノロジー社にて QualNet の設計開発をリード。平 19-05 米国スペースタイムエンジニアリング社設立, Scenargie の設計開発に従事。IEEE, ACM 各会員。