

複数の要因が無線ネットワークの性能に与える影響の分析手法

中村 雅俊 山口 弘純 東野 輝夫

大阪大学 大学院情報科学研究科 情報ネットワーク学専攻

565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

{mas-nkmr,h-yamagu,higashino}@ist.osaka-u.ac.jp

モバイルワイヤレスネットワークのプロトコル、およびそれを基盤としたシステムやサービスの性能は、プロトコルパラメータの値や、各レイヤで用いられるプロトコルの組み合わせといったネットワーク要因とともに、ネットワーク構成ノードの密度や移動速度、移動方向、無線通信機能などといった実行環境要因とも深く関係する。これら多数の要因の中で、どの要因組がシステムの性能に真に支配的影響を与えるかを見極めることは、例えば特定のプロトコルや環境の組み合わせにおける性能低下を発見する用途などを考慮した場合は極めて重要であるにも関わらず、多岐にわたる要因値の組み合わせ総数を考慮した場合には容易でない。本稿では、性能に影響を与える要因組の特定を効率よく行える性能試験法を提案する。提案手法では、ソフトウェアの機能試験でしばしば用いられるペアワイズテストの概念を応用し、小さい試験集合から要因組を徐々に絞り込むことでそのような要因組を無駄なく機械的に特定する。提案手法により、DSR 上の TCP コネクションの通信性能と各パラメータ値との関係を明らかにできることを示し、提案手法の有用性を確認した。

A Method to Analyze Impact of Multiple Factors on Performance of Wireless Network Systems

Masatoshi Nakamura Hirozumi Yamaguchi Teruo Higashino

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

Performance of wireless networks deeply depends on the parameters that are involved in the protocols, combination of functionalities in different protocol layers, and environmental factors like node density, mobility and communication capabilities of mobile nodes. Given the variety of these factors, it is difficult to identify the particular factors or their combinations that truly have impact on the performance, even though it is significantly important to identify performance degradation under specific environments and parameter settings. In this report, we propose a method to conduct combinatorial performance testing of mobile wireless networks with smaller amount of test cases, while attempting to maximize coverage. We exploit pairwise testing strategy to generate basic sets of test cases, but we first show that simple pairwise strategy does not work well for performance testing of wireless networks. We have proved that they achieve reasonable coverage against the complete combinatorial tests in analysis, and the experimental results have shown that we could identify correlation between the throughput of TCP connections and several protocol parameters defined in different layers.

1 まえがき

無線ネットワークシステムは、データリンク層、ネットワーク層、トランスポート層の既存のプロトコルや要求する通信の性質に合わせて新たに実装されたプロトコルを組み合わせで実現される。個々のプロトコルはプロトコルパラメータやシステム状態変数、もしくは経路キャッシュなどのようにプロトコルが備えるオプション機能の選択など性能を左右する多数の要因を含む。また、ネットワークの構成要素である移動ノードの密度や速度、移動方向、あるいは移動ノードや固定基地局の通信性能といった実行環境要因にも大きく影響を受ける。

一般にプロトコルやシステム開発におけるシミュレーションを含む多くの性能試験は、着目する要因値のみ変化させ、他の要因は適当な値を利用して固定し、各要因が与える影響を測定することが多い。しかし、この方法では各要因の変化が性能に対しどの程度影響を与えるかの測定はできるものの、各要素が他要素と比較してどの程度支配的な影響を与えるかは判断できない。例えば複数の要因の中で性能

に与える影響が支配的となる要因組を特定したり、支配的とならない要因組を排除したりするためには、すべての要因がとりうる値の組み合わせをすべて試験対象とすることが理想的であると言える。

しかしこの方法は、(i) 試験総数の増大、及び (ii) 試験結果からの有意データ抽出の困難性、に関する問題があると考えられる。(i) については、例えば、 N 個の各要因の離散値数がそれぞれ M である場合、単純な組み合わせ総数は M^N となり、極めて非現実的な数となる。また (ii) については、 M^N の試験結果を用いて、要因組の特定や排除を行う必要があるが、これについては従来、試験者の勘と経験に頼っていた側面が大きい。

実環境へのサービス展開やサービス開始後の管理維持コストなどを考えた場合、どのような要因組がシステムの性能に影響するかを設計および実装段階で見極めることは極めて重要である。しかし一方で、前述の問題などにより、現在のネットワークシステムの研究における性能評価の多くは、独自の観点で選定した高々3程度の要因の相互関係を

調べるにとどまっている [1]。したがって、(i) 適切な試験数で、(ii) 性能に支配的な影響を与える要因組の組み合わせを半機械的にかつ効率良く行えるような性能試験の方法論が望まれる。

本稿では、無線ネットワークの組み合わせ性能試験を効率よく行う方法を提案する。本手法は、性能に支配的な影響を与える要因組を機械的かつなるべく必要十分な試験数で特定することを目的とする。

以下、性能に影響する N 個の要因と各要因がとりうる M 個の離散値（これを以下、水準とよぶ）について、各要因ごとにある水準を与えた水準の N 項組を単に試験、その集合を試験集合とよぶ。提案手法ではベアワイズ試験（一般には t -wise 試験）[2-4] の手法を応用する。 t -wise 試験は、ソフトウェアの機能試験において、不特定の機能の組み合わせによる不具合の発生などを効率よく試験するために用いられている。 t -wise 試験は、どの t 個の要因組に対しても、それらの水準のどのような組（ t 項組）もいずれかの試験に現れるような試験集合を生成する手法である（ t が要因数 N に等しい場合はすべての試験を含む試験集合を生成する）。これにより、要因組の大きさが高々 t である場合、 t 以下の大きさの要因組を網羅的に試験できる試験集合をなるべく少ない試験総数で生成できる。

しかし、システムが機能するか否か（試験結果が正しいか否か）を各試験に対して明確に判定できる機能試験に対し、性能試験における支配要因組の特定のためには、スループットなどの性能指標値の変化をなんらかの方法で定量化し、要因組がそれに与える影響を判断するための方法論が必要となる。また性能指標値の変化を定量化するためには必要十分な試験数を確保する必要がある。 k -wise 試験はこれらの点で性能試験における要因組特定に十分でないことを 2.2 節において議論する。一方、提案手法では、ある要因のみを変化させ、他の要因を固定した試験群に対応する性能指標値群を求め、これを指標値の系列と見なす。この系列を様々な試験に対して求め、系列間の順位相関を導出する。系列の組が高い相関を持つほど、対応する試験において水準が共通しない要因は性能指標に与える影響が小さいことがわかるため、それ以外の要因組のより詳細な性能試験を行っていく操作を繰り返すことで要因組の特定を行う。

無線ネットワーク上で TCP 通信を行う際には、通信の帯域や安定性に問題があることが知られている。そこで、提案手法を用いて、MANET のルーティングプロトコル DSR [6] 上の TCP セッションに対するシミュレーション性能試験を実施したところ、xxx と xxx の要因組を発見することができた。

2 提案する試験手法

2.1 k -wise 試験法の概要

N 個の要因 (factor) $F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ に対する組み合わせ試験を考える。 f_i ($1 \leq i \leq N$) の定義域が M_i 個の離散値で表される場合、これらを $L_i = \{l_{i,1}, l_{i,2}, \dots, l_{i,M_i}\}$ と表し、各値を水準 (level) とよぶ。したがって試験とは各要因への水準の割り当てであり、その集合を試験集合とよぶ。任意の t 個の要因への任意の水準の割り当てが試験集合 R に含まれるいずれかの試験の部分割り当てであるときに限り、 R は t -wise 試験集合であるという。

例として、表 1 のように MAC 層、トランスポート層、アプリケーション層からそれぞれ 1 つずつプロトコルパラ

表 1: 無線システムにおける要因と水準例

Layer	Protocol	Factor	Level
MAC	IEEE802.11	QueueLength	50, 100, 200 (Packets)
Trans.	UDP	PacketSize	256, 512, 1024 (Bytes)
App.	CBR Rate	SendRate	10, 20, 40 (kbps)

表 2: 2-wise 試験集合の生成例

試験	QueueLength	PacketSize	SendRate
1	100	1024	10
2	200	256	40
3	50	512	10
4	200	1024	20
5	50	256	20
6	100	512	40
7	200	256	10
8	50	1024	40
9	100	256	20
10	200	512	20

メータを取り出してこれらを要因とし、各要因の水準数を 3 とした場合の 2-wise テストは 2 のようになる。

ここで Queue Length と Packet Size の 2 つの要因に注目する。これらのとりうる水準の組み合わせは、(50, 256), (100, 256), (200, 256), (50, 512), (100, 512), (200, 512), (50, 1024), (100, 1024), (200, 1024) の 9 つであり、それぞれ番号 5, 9, 2 (及び 7), 3, 6, 10, 8, 1, 4 の試験に含まれていることが分かる。ここで、任意の 2 つの要因の組 (Queue Length, Packet Size), (Queue Length, Send Rate), (Packet Size, Send Rate) のいずれに着目した場合でも、それらの要因が取る水準の組み合わせは必ずいずれかの試験に含まれていることがわかる。

2.2 組み合わせ性能試験における t -wise 試験法の問題

要因 $F = \{A, B, C, D\}$ 、各要因の水準が 1 および 2 であるとき、3-wise 試験集合の例を表 3 に示す。これに対し、 A の水準を x 軸、説明の都合上適当に決定したある仮想的な性能指標値を y 軸としたグラフを図 1 に示す。この例における 3-wise 試験集合では、すべての 3 要因の水準組み合わせを含みかつ試験総数をなるべく少なくしたものである。要因組がどの程度性能指標値に変化をおよぼすかは図 1 から判断する定量的基準を導出することは容易でなく、また、そのための試験数も十分でない。

一方、 A を除く要因 $F_{-A} = \{B, C, D\}$ における 2-wise 試験集合 (試験数 4) と、 A の 2 水準を組み合わせた 8 試験の集合を表 4 に示す。これを A の水準を x 軸、性能指標値を y 軸としたグラフを図 2 に示す。このグラフでは、 A を F_{-A} の試験と組み合わせるために、 F_{-A} の要因が性能指標値にどのような影響を与えるかを、要因 A を変化パラメータとした性能変化の傾向として捉えることができる。例えば、 $(B, C, D) = (1, 2, 1)$ と $(B, C, D) = (1, 1, 2)$ の系列を比較し、その変化傾向に類似性が高いとすれば、少な

表 3: 要因 A,B,C,D に対する 3-wise テスト集合の例

試験	A	B	C	D
1	2	1	1	2
2	2	2	2	2
3	1	1	2	2
4	1	1	1	1
5	1	2	2	1
6	2	2	1	1
7	2	1	2	1
8	1	2	1	2

表 4: 要因 A と, A を除く要因集合 $F_{-A} = \{B, C, D\}$ における 2-wise テストケースとの組み合わせにより生成される試験集合

試験	A	B	C	D
1	1	1	2	1
2	1	1	1	2
3	1	2	2	2
4	1	2	1	1
5	2	1	2	1
6	2	1	1	2
7	2	2	2	2
8	2	2	1	1

くとも C および D の水準を変更しても性能変化傾向に影響を与えないことがわかる。したがって、(同様に他のパターンでの変化傾向を総合的に判断して) 例えば C, D の組み合わせは性能変化に影響しない、といったことを判断していく。性能への影響を疑われる要因組については、より詳細な試験を順次行っていくことで最終的に特定する。提案手法では、各要因について t -wise 試験と組み合わせた試験集合を生成する。したがって、上記の例では、8 試験の集合が要因ごとに生成されるため、計 32 試験が生成される。なお、提案手法では、 $t = 1$ から開始し、性能への影響が疑われる要因がなくなるまで t の値の順に大きくしていく方法を採用する。

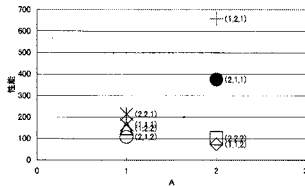


図 1: 3-wise テストケースによる性能試験結果の例

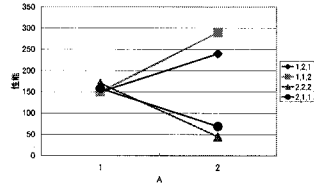


図 2: 提案手法による性能試験結果の例

2.3 提案する性能試験法の詳細

以下、要因集合 F に対し、 F の k -wise 試験集合を $R[F, k]$ で表す。提案手法は、要因集合 F と各要因 f に対する水準集合 $L(f)$ が与えられるとする (ただし $|F| > 2$ とする)。また、パラメータ k および、 F の部分集合の集合 U_{tmp} および U を導入する ($U_{tmp}, U \subseteq \mathcal{P}(F)$)。なおこれらの初期値を $k = 3, U_{tmp} = \bigcup_{f \in F} \{\{f\}\}, U = \emptyset$ とする。最終的に得られる U が、性能に影響を与える要因組の集合となる。以下、 T を要因集合 F に対する試験集合とし、その初期値を $T = \emptyset$ とする。

また、 $G \times R[H, k]$ で、要因集合 G のすべての水準値の組み合わせと、 $R[H, k]$ の各試験とのすべての組み合わせにより生成される要因集合 $G \cup H$ 上の試験集合を表す。

提案する試験法は以下の手順で試験を行う。

1. 各要因の全水準値と $(k-2)$ -wise 試験集合の試験との組み合わせからなる試験集合を導出する。ただし、 $k-1$ の段階で性能への影響を疑われる要因組の集合 U_{tmp} へのみ試験を適用するため、具体的には、各要因 $f \in F$ とパラメータ k に対し、以下を求める。

$$T' \leftarrow \left\{ \bigcup_{f \in F, u \in U_{tmp}} \{f\} \times u \times R[F \setminus \{f \cup u\}, 2] \right\} \setminus T$$

$$T \leftarrow T \cup T'$$

2. 各試験 $t \in T$ をターゲットシステムに適用し、性能指標値 $E[t]$ を (まだここまでの手順でまだ得られていない場合には) 得る。
3. 各要因 f をパラメータとした性能指標値変化を表す系列を計算する。具体的には、各要因 $f \in F$ と T の試験から要因 f を取り除いた試験集合 T_{-f} の各試験 $t_{-f} \in T_{-f}$ に対し、 $E[t]$ を f の水準値順にしたがって系列化する。試験 t_{-f} を含む試験に対する性能指標値群を f の値変化に伴う系列としたものを、以下 $\bar{E}[t_{-f}]$ で表し、性能指標値系列とよぶ。
4. 各 f について、 f を除く $k-2$ 以上の要因数の水準値が一致する各試験組について、それらの性能指標値系列間の相関係数を得る。ここで、性能指標値系列の

相関を表す指標として、提案手法では主に順位相関を考える。順位相関は、系列が同じ増加傾向、もしくは減少傾向を表すときに高い相関値を示すため、値が異なる2つの性能指標値系列の変化傾向の類似度を判定するのに適していると考えられるためである。ただし、提案手法は特定の相関係数に依存するものではなく、他の相関判定関数の利用を妨げるものではない。

具体的には、 T の試験から f を除いて得られる試験集合 T_{-f} の試験の各組 $t_{-f}, t'_{-f} \in T_{-f}$ において、 $k-2$ 以上の要因の水準が一致する ($|t_{-f} \cap t'_{-f}| \geq k-2$) 場合、 $\bar{E}[t_{-f}]$ と $\bar{E}[t'_{-f}]$ の順位相関 $C[t_{-f}, t'_{-f}]$ を求める。

5. 大きさ $k-2$ の要因組に対し、大きさ $k-1$ の要因組の情報を用いて、(i) それが性能に影響を与える可能性がある要因組か否か、および (ii) それを含むより大きな要因組がより性能に影響を与える可能性があるか否か、を判定する。(ii) に該当しない場合は、この時点で試験を終了できる。そうでない場合は k の値を増加させてこれまでの手順を行い、疑われる要因組のさらに詳細な特定を行う。

以下、要因集合 H 上の試験の組 t, t' と、 H の部分集合 H' に対し、各要因 $h \in H'$ について h の水準が t と t' において等しい場合、 $t \equiv_{H'} t'$ と表す。

検証対象である要因組 $u \in U_{tmp}$ を含み、かつ要因数が $|u|+1$ である任意の要因組 u^+ について、 u^+ の水準が一致している任意の試験の組に対する性能指標値系列の相関係数の中での最小値が、 u の水準が一致しているそれと大きな変化が観測できない場合は、要因組 u に要因を追加しても性能に与える影響は変わらないと見なし、 u を含むより大きな要因組の検証は行わない。もし、 u におけるその相関係数最小値が一定の閾値 ΔTh を超えていれば、十分性能に大きい影響を与えるものとみなし集合 U に追加する。そうでないときは、 u^+ を更なる検証対象にする (U_{tmp} に加える)。いずれの場合も u は U_{tmp} から取り除くものとする。

具体的には、まず

$$\min[\equiv_u] = \min\{C[t_{-f}, t'_{-f}] \mid t_{-f}, t'_{-f} \in T_{-f}; t_{-f} \equiv_u t'_{-f}; f \in F\}$$

と定義し、各 $u \in U_{tmp}$ について、 $u^+ \supset u$ かつ $|u^+| = k-1$ である各要因組 u^+ に対しても $\min[\equiv_{u^+}] \approx \min[\equiv_u]$ であるなら、

- $U_{tmp} \leftarrow U_{tmp} \setminus \{u\}$
- $U \leftarrow U \cup \{u\}$ iff $\min[\equiv_u] > Th_{high}$

そうでなければ $u^+ \supset u$ かつ $|u^+| = k-1$ かつ $\min[\equiv_{u^+}] - \min[\equiv_u] > \Delta Th$ である各 u^+ に対し、

- $U_{tmp} \leftarrow U_{tmp} \setminus \{u\}$
- $U_{tmp} \leftarrow U_{tmp} \cup \{u^+\}$

6. もし $U_{tmp} \neq \emptyset$ であれば、 $k \leftarrow k+1$ として (1) に戻る。そうでなければ U を返して終了する。

2.4 試験の必要十分性に関する議論

単純に組み合わせ試験を考えた場合、提案する試験法のほかに、いくつかの方法が考えられる。以下ではその代表的なものに対し、性能指標値に影響を与える要因組特定目的に対する必要十分性を議論する。具体的には以下の方法が考えられる。

- 各要因についてそのすべての水準に対し、残りの要因の水準をランダムもしくは適当な値 (例えば代表値) を利用して設定し、それらの組み合わせにより試験を行う方法 (多くの性能試験、以下単純試験法)。
- 各要因についてそのすべての水準に対し、残りの要因の試験を k -wise 試験により生成し、それらのすべての組み合わせにより試験を生成する方法 (提案手法)
- k -wise 試験法

ここで、 t 要因の組が性能に影響を与え、かつ最大であることを示すためには、(i) 任意の t 要因組の任意の水準組による試験を行うことができ、(ii) その t 要因が性能指標値に変化を与えることを示し、(iii) それを含む $t+1$ 以上の要因組を考慮しても、性能指標値変化に与える影響は t の場合とほとんど変わらないことを示す必要がある。単純試験法はその生成方法から明らかにこれらすべての条件を満足できない。 k -wise 試験法は適切な k の値の設定により (i) は充足可能である。ただし、もともと k -wise 試験法は、各要因の水準にばらつきをもたせることにより組み合わせ網羅率を向上させることを目標としているため、性能変化を検出する目的には適していない。したがって (ii) や (iii) を満足するためには、相当数の試験を生成する必要があることと、指標値変化を分析する方法を考慮していないことが問題となる。

提案手法は上記をなるべく少ない試験総数で満足することを目標として設計している。上記は試験の網羅率 (test coverage) および試験の品質 (test quality) に関する一般的議論であるが、今後これらに対する定量的指標を導入し、各手法を分析して提案手法の優位性、有用性を示すこと、ならびに提案手法が上記条件を充足していることを形式的に示す予定である。

3 適用事例

これまで説明した試験手法の利便性を確認するため、シミュレータ上で性能試験を実施した。

3.1 性能試験の概要

MANET 上の TCP 通信は MAC 層における輻輳制御や、経路切断に伴うルートの再探索によるオーバーヘッドが大きいため、従来の TCP プロトコルをそのまま MANET 上で動作させるとウィンドウサイズの制御がうまく働かず、安定した通信が行えないことが知られている [7, 8]。そこで、ネットワーク中に TCP コネクションを1セッション張り通信を行うようなシナリオで、通信性能の試験を実施した。シナリオは送受信ノードを正方形領域の対角に固定して配置し通信を行うもので、中継ノードは静止しているものとする。

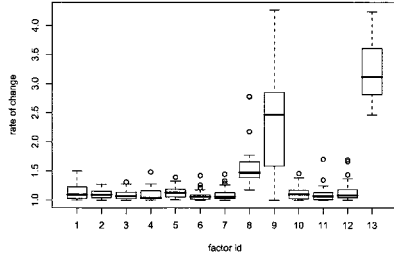


図 3: 各要因の水準変化に対する性能指標値の変化率

性能指標はパケット到着間隔の中央値とし、これに対して影響を及ぼす要因の特定を行う。さらに、プロトコルや環境のパラメータ値の組み合わせによって TCP セッションが不安定になる状況が再現することを確認し、安定した通信を可能とするパラメータの組み合わせについての知見を得ることを目標とする。試験はネットワークシミュレータ GTNetS [9] 上で行い、*t*-wise テストケースの生成には PICT [2] を用いた。今回採用した各層のプロトコルが持つパラメータと通信環境のパラメータの取る代表値水準を表 5 に示す。

3.2 性能試験の実施

アルゴリズムにおけるパラメータ $k = 3$ から性能試験を開始した。13 個のパラメータ (要因) に対し、それぞれの解析に生成された試験数は 83 から 189 で、総計では 2002 となった。

3.3 性能試験結果の解析

3.3.1 性能指標値の変化率

他の要因の水準を固定しながらある要因の水準を変化させたときの性能指標値の変化率 (性能指標値の最小値に対する最大値の割合) を集計した箱ひげ図を図 3 に示す。ここで、性能指標値変化率が大きい要因は、それ自体がある程度性能に影響を与えることが想定される。変化率は多くの要因においては 1~1.3 の範囲に収まっているのに対し、セグメントサイズ (factor id 8)、広告ウィンドウサイズ (factor id 9)、領域の広さ (factor id 13) の 3 要因について変化率は 1.5 以上を示している。これらの 3 要因 (広告ウィンドウサイズ、セグメントサイズ、領域の広さ) について、これらの要因組が支配的要素組となっているかを解析する。

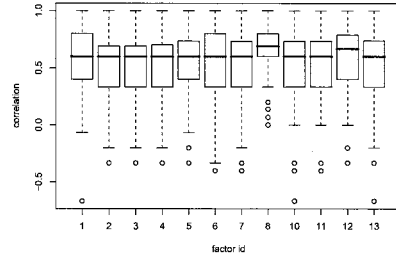


図 4: 広告ウィンドウサイズについての順位相関係数

3.3.2 順位相関係数からの性能解析

次に、性能指標値系列間の順位相関係数を求めた。調査対象の要因を除く各要因ごとに、その要因の水準値が同じであるもの同士について順位相関係数を集計した。

広告ウィンドウサイズ 広告ウィンドウサイズに対する性能指標値系列の相関係数の分布を図 4 に示す。縦軸には系列間の相関係数が、横軸には U_{tmp} に含まれていた要因の id がそれぞれふられている。相関係数の最大値は U_{tmp} に関わらずいずれも 1 に近い一方で、最小値と下側四分位についてはばらつきが見られる。セグメントサイズ (factor id 8) の下側四分位が 0.6 であるのに対し、他は 0.3 近辺に固まっている。また、セグメントサイズの最小値が 0 であるのに対し、他は -0.3 を下回る。このため、広告ウィンドウサイズは単独で直接性能に影響するのと同時に、セグメントサイズとの組においても支配的な要因であることもわかる。

セグメントサイズ 一方で、セグメントサイズに対して性能指標値系列の相関係数の分布を取ったところ、何れの性能指標値系列の間でも 0.8 以上の強い相関が見られ、単調増加を示していた。このため、今回用いた環境下での性能についてはセグメントサイズは最大の 1460Byte を選ぶことで最も高い性能が得られ、この条件下で最適な広告ウィンドウサイズを探すのが良いといえる。

領域の広さ 領域の広さに対しては、全ての系列において性能は単調減少を示し、順位相関係数も等しく 1 であった。今回の性能試験では、送受信ノードを領域の端に配置しているため、領域の拡大は SD 間距離や通信 HOP 数の拡大を意味する。SD 間距離については他の要因によらず支配的に性能に影響しているといえる。

4 まとめ

本稿では、無線ネットワークの性能に支配的影響を与える要因組の特定を効率よく行える性能試験法を提案した。提案手法では、ソフトウェアの機能試験でしばしば用いら

表 5: パラメータと代表値

MAC 層 (IEEE 802.11 DCF with RTS/CTS)					
id	要因名	水準			
1	QueueLength	50	100	200	400
2	CWMin	31	63	127	255
3	CWMax	1023	2407	4095	8191
ネットワーク層 (DSR)					
id	要因名	水準			
4	RouteCacheTimeout	4	8	16	32 300
5	SendBufferTimeout	15	30	60	120
6	SendBufferSize	16	32	64	128
7	EnableRingSearch	true	false		
トランスポート層 (TCP Tahoe)					
id	要因名	水準			
8	SegmentSize	256	512	1024	2048
9	AdvWin	256	512	2048	4096 8192 16384
10	RtoMin	0	1	2	4
11	RtoMax	20	40	80	160
環境パラメータ					
id	要因名	水準			
12	100m 四方あたりノード数	4	8	16	
13	領域広さ (m)	200 × 200	400 × 400	600 × 600	

れるペアワイズテストの概念を応用し、小さい試験集合から要因組を徐々に絞り込むことでそのような要因組を無駄なく機械的に特定する。提案手法により、DSR 上の TCP コネクションの通信性能と各パラメータ値との関係を明らかにできることを示し、提案手法の有用性を確認した。

今後の課題は、このような組み合わせ性能試験における試験網羅率および試験品質についての定量的指標を導入し、それに基づき提案手法の優位性を他手法に対して定量的に示すこと、ならびに判定自動化のためのツールセットを完成し、シミュレーション支援環境として提供することなどである。

参考文献

[1] Kurkowski, S., Camp, T. and Colagrosso, M.: MANET Simulation Studies: The Incredibles, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 9, No. 4, pp. 50–61 (2005).

[2] Czerwonka, J.: Pairwise Testing in Real World, *Proc. 24th Pacific Northwest Software Quality Conference*, pp. 419–430 (2006).

[3] Cohen, D. M., Dalal, S. R., Fredman, M. L. and Patton, G. C.: The AETG System: An Approach to Testing Based on Combinatorial Design, *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 23, No. 7, pp. 437–444 (1997).

[4] Lei, Y. and Tai, K.: In-parameter-order: a test generation strategy for pairwise testing, *Proc. 3rd IEEE International High-Assurance Systems Engineering Symposium*, pp. 254–261 (1998).

[5] 山本訓稔 ■ 秋山浩一 ■ 直交表を利用したソフトウェアテスト - HAYST 法 ■ ソフトウェア・テスト PRESS Vol.2 ■ 技術評論社 (2005).

[6] Johnson, D. B., Maltz, D. A. and Broch, J.: DSR The Dynamic Source Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks, *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley, pp. 139–172 (2001).

[7] Liu, J. and Singh, S.: ATCP: TCP for mobile ad hoc networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 19, No. 7, pp. 1300–1315 (2001).

[8] Xu, S. and Saadawi, T.: Revealing the problems with 802.11 medium access control protocol in multi-hop wireless ad hoc networks, *Comput. Networks*, Vol. 38, No. 4, pp. 531–548 (2002).

[9] Riley, G. F.: The Georgia Tech Network Simulator, *Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Models, Methods and Tools for Reproducible Network Research*, pp. 5 – 12 (2003).