

感度解析手法（IPA法）を用いた 分散環境評価方式

矢野隆則

(株)リコー 中央研究所

汎用的な分散システム設計支援ツール構築の為に、シミュレーションにより典型的な通信トラフィック（イベント発生系列）を抽出した後、感度解析（IPA法）を用いて評価パラメータに対するシステムの感度を計算する性能評価方式を開発した。この方式は、IPA法の適用条件により、解析対象のシステムの通信処理手順が評価パラメータの変動に対して影響されないことを前提としている為、使用制約をもつという問題点を持っていた。そこで、対象の分散システムの形態によって生ずるこれらの問題点を明確にし、新たにIPA法による解析結果とその解析結果の成立条件を同時に抽出し明示することで、よりの確な判断を可能にする方式を提案する。

Distributed System Performance Evaluation Utilizing Sensitivity Analysis (Infinitesimal Perturbation Analysis)

Takanori Yano

Research And Development Center, RICOH Company, Ltd.

13-1 Shinei-cho, Kohoku-ku, Yokohama, 223 Japan

A distributed system performance evaluation tool is developed. This system consists of a simulation part which draws typical sample event paths and a IPA (Infinitesimal Perturbation Analysis) part which calculates sensitivities to given parameters. After introducing this system, some problems included in IPA method are clarified. Considering these issues, a new more useful evaluation method is suggested which shows conditons of these IPA results as well as evaluation results themselves.

1. はじめに

最近のオフィスでは、ますます大規模かつ複雑なネットワーク化された形態でOA機器が利用されるようになり、分散システムが構築される場合が多くなってきている。

ところが構築された分散システムは、導入後の大幅な変更が困難である場合が多い為、性能を評価しながら設計することが望ましく、分散システム全体を設計時に評価する有効なツールが必要である。

その為には汎用的な分散システムの評価方式の確立が不可欠であるが、従来分散システムの特徴パラメータの解析に於て主に用いられていた待行列モデルに基づく性能評価方式では対象が制限されてしまう欠点があった。

この問題点解決の為、従来あまり用いられていなかったシミュレーション法とIPA法(Infinitesimal Perturbation Analysis)とを融合したシステム性能評価方式を用いた分散システム設計支援用性能評価システムの開発を行った。本稿では、IPA法を用いた性能評価システムと、IPA法適用の際の問題点を考慮した改善案に付いて報告する。

2. IPA法を用いた感度解析

IPA法は、システムの基本的性質を知る方法(パラメータ感度分析法)の一つである。

このIPA法を応用することで、これまで余り用いられなかった評価対象である分散システムのある評価パラメータに対するシステムへの影響度を抽出する評価方式が実現できる。

この方式によれば、待行列理論に基づく分析で待行列へのモデル化が困難な複雑なシステムに対しても時系列モデル化(イベントの発生系列の抽出)は容易な為、適用範囲は広いが比較的単純な方式により評価分析が可能になると期待できる。

IPA法は解析対象のシステムの動作の挙動が典型的なイベント発生系列(Sample Path)の形式で求められていることを前提として分析がなされる。

そこで、分散システムの評価手法として、まずイベント発生系列を求める為のシミュレーションを行い通信要求のトラフィック(Sample Path)を各通信メディアに対して推定した後、各メディア毎独立にIPA法により通信要求処理の効率を評価するツールを開発した。

シミュレーション使用以外にも、IPA法は実測値をイベント発生系列として用いることで現存するシステムの評価にも応用できる。

IPA法は以下の様に定式化される。

X_j j番目のメッセージ長
 S_n n番目のBP(busy period)の次段のBPへの遅れ時間
 k_n n番目のBPの最初のメッセージの通番
 n_n n番目のBPのメッセージの総数
 t_i i番目のメッセージのシステム処理時間
 N メッセージ総数 H ヘッダ長 r ヘッダ処理時間
 L_j j番目のメッセージ長 o メッセージ処理効率(時間/長さ)
 T システム処理総時間 a 評価パラメータ(Ex. r, o)

$$\Delta t_{kn+i} = \Delta S_{n-1} + \sum_{j=1}^i \Delta X_{kn+j} \quad (i \leq n_n)$$

$$\Delta T = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{n_n} \Delta t_{kn+i} / N$$

$$\begin{aligned} dT/da &= \lim_{a \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \Delta T / \Delta a \\ &= \lim_{a \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{n_n} \{ \Delta S_{n-1} + \sum_{j=1}^i \Delta X_{kn+j} \} / N \Delta a \\ &\approx \lim_{a \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{n_n} \Delta X_{kn+j} / N \Delta a \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{kn+j} &= (H + L_{kn+j}) \times o \\ &= H \times o + L_{kn+j} \times o \\ &= r + L_{kn+j} \times o \quad \text{より} \end{aligned}$$

(1) $a = o$ (メッセージ処理効率)として

$$\Delta X_{kn+j} / \Delta o = (H + L_{kn+j}) = X_{kn+j} / o$$

$$\begin{aligned} dT/do &= \lim_{o \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{n_n} \sum_{j=1}^i \Delta X_{kn+j} / N \Delta o \\ &= \lim_{o \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{n_n} \sum_{j=1}^i X_{kn+j} / N \times o \\ &\approx \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{n_n} \sum_{j=1}^i X_{kn+j} / N \times o \end{aligned}$$

(2) $a = r$ (ヘッダ処理時間)として

$$\Delta X_{kn+j} / \Delta r = 1$$

$$\begin{aligned} dT/dr &= \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{n_n} \sum_{j=1}^i \Delta X_{kn+j} / N \Delta r \\ &= \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{n_n} \sum_{j=1}^i 1 / N \\ &\approx \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{n_n} \sum_{j=1}^i 1 / N \end{aligned}$$

ここで、BP(busy period)とは、イベント系列の中で何等かのイベントが発生している期間を示している。

開発された分散システム性能評価アルゴリズムは以下の4ステップよりなる。

(1) Sample Pathを求める。

分散システムの条件(形態及び典型的通信要求の定義)に基づいてシミュレーションを実行し、各ネットワークの通信要求Event Pathを求める。通信要求は以下の様に表す。

通信要求Event Path =

((Tbgn1, X1), (Tbgn2, X2), ..., (TbgnN, Xn))

(2) 初期設定

j (メッセージ番号)=0
 $XSUM$ (BP中それまでの X_j の合計値)=0
 $JSUM$ (BP中それまでの1の合計値)=0
 $HSUM$ (BP中 $XSUM$ の累計)=0
 $GSUM$ (BP中 $JSUM$ の累計)=0
 $TBGN$ (BPの最初のメッセージ開始時)=0

(3) $JSUM$ と $GSUM$ の計算

(3-1) $j = j + 1$
 (3-2) $j > N$ の時 (4)へ
 (3-3) $TBGN + XSUM < TBGN_j$
 の時 $XSUM = 0$ $JSUM = 0$
 (3-4) $XSUM = XSUM + X_j$
 (3-5) $JSUM = JSUM + 1$
 (3-6) $HSUM = HSUM + XSUM$
 (3-7) $GSUM = GSUM + JSUM$
 (3-8) (3-1)へ

(4) 推定値算出

$dT/d_o = JSUM / (N \times O)$
 $dT/d_r = GSUM / N$

IPA法の計算は、近似により単純な繰り返し計算になっていることがわかる。

3. 実験&検討結果

実験では本評価システムを用いて、簡単な分散システム (図1参照) に於て、通信要求頻度の大きい場合と小さい場合を比較して、ネット

ワークの物理的処理効率を上げる必要があるかあるいは、メッセージのヘッダ部分の長さを調節することで改良可能かをシステム全体の処理時間に対する影響の度合を調べることで検討可能であることを示す。

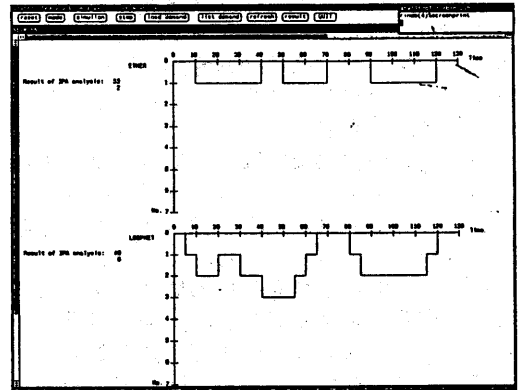


図2.

本システムの使用例を示す。

図1は分散システムの構造、及び処理要求の定義をした後、通信要求処理をステップごとにシミュレーションし実行している時の途中結果を示す。これは実験で評価対象とした分散システムの構成である。4つのTM (端末) と2つのネットワークA, Bで構成されている。端末には便宜上名前が付けられて表示している。この様にビジュアルに処理の様子が確認できる。

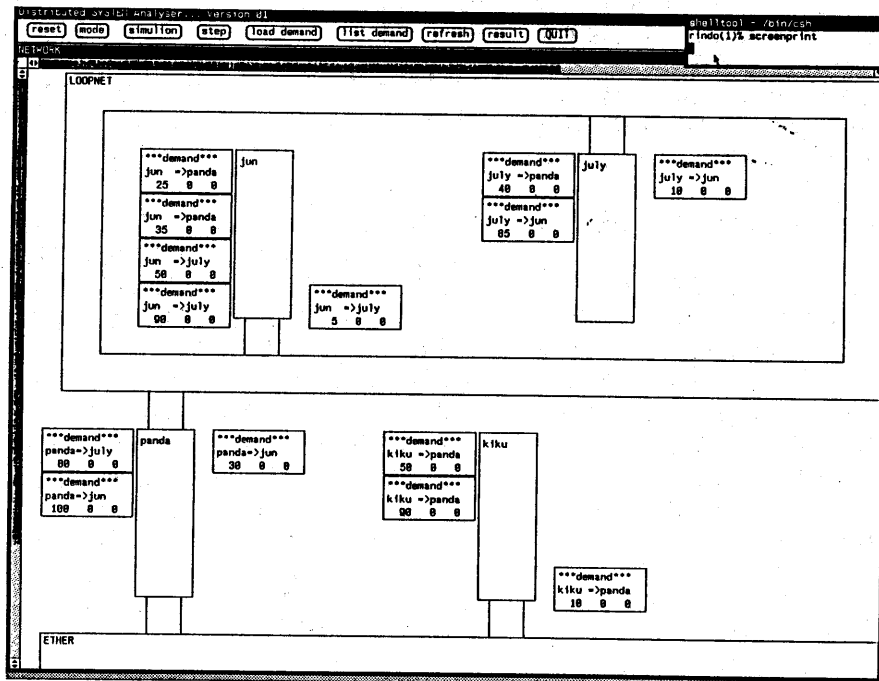


図1.

また計算結果と通信トラフィックの時系列変化をグラフで見ることができ、各々のメディアの注目変数変動に対する処理効率への影響がわかる様になっている。図2に結果の表示例を示す。計算結果は以下の様になる。

・ネットワークA（通信要求頻度大）

$dT/d_o = 4.9$ $dT/d_r = 6$

・ネットワークB（通信要求頻度小）

$dT/d_o = 5.3$ $dT/d_r = 2$

通信要求頻度が大きでも小さでも dT/d_o （ネットの物理的処理効率の影響）に対しては大差ない。一方、 dT/d_r （メッセージのヘッダ部分の長さの影響）は通信要求頻度が大きい程影響が大きいことを示している。

メッセージのヘッダ部分の影響は、メッセージ数と比例関係にある筈だから妥当な結果であると言える。一方ネットの物理的処理効率の影響は通信頻度の影響に関係なく同じであるのも妥当な結果と言える。

4. IPA法適用の際の問題点

IPA法は評価パラメータの値が変動した時に、通信処理系列が同じである範囲内で成り立っている。なぜなら、IPA法を適用する為には、典型的なパス(Nominal Path)から正しいParturbed Pathが推定できないといけませんが、評価パラメータの変動によって、通信処理経路の変動等が起こり、通信処理系列がNominal Pathのものと異なる場合は、Parturbed Pathの推定ができない為、IPA法は正しく適用できないからである。その為、以前提案した2章の方式[7]では、典型的な通信要求から、各々のネットワークの典型的なPathを基に計算する為、評価パラメータの値が少し変動しても、通信要求の順序は、絶対に変化せず、各ネットワークの負荷も変化しないことを仮定する必要があった。[8][9][10]

解析対象のネットワークの通信経路が1つであるならば、この仮定は成り立つが、一般的な複数個のネットワークが互いに結合している時は、次に検討する様なネットワーク間の影響が問題となる場合がある。これは、ネットワーク間の影響で、評価パラメータの変動によってParturbed Pathの通信処理手順が、Nominal Pathのものと異なり、IPA法の結果が正しく抽出されない場合がある為である。

2章の方式でも、解析を実行する時、パラメータの変動範囲を試行錯誤的にいくつか試してみることで通信処理体系の変動を考慮することはできたが、その為の試行回数が余分に必要で、

どの程度計算すれば良いかが不明確であった。

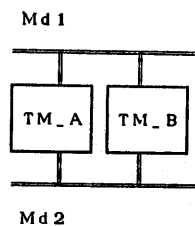
そこで、分散システムの中の複数個のネットワーク間の影響の為に通信処理順序に変更される可能性のある以下の2つの問題点を考慮して、解析時にIPA法が成立している評価パラメータの変動許容範囲を明確にし、どの程度まで解析結果が満足のものであるかを明らかにする改善方式を提案する。

第一に図3(a)の様な、あるターミナル(TM)から他のあるTMに通信する場合に、複数個の道(並列の道)がある場合である。この様な場合は、通信経路は状況に応じてどちらを選択するかが通信時刻や通信方式によって異なると考えられる。

第2に図3(b)に示す様な、複数個の通信路を介して通信がシーケンシャルに転送されていく場合(直列結合の場合)である。この場合は、直列結合の所で、処理効率が伝搬する場合は、ある通信経路の処理の遅れなどの影響が、次の通信経路の処理に影響される可能性があると考えられる。

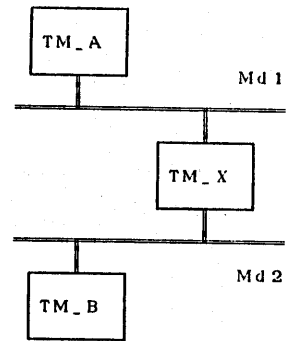
図3(a) 並列の場合

(TM_A => TM_B)



(b) 直列の場合

(TM_A => TM_B)



これらのことから、問題としている通信経路に於て、評価パラメータの値の変化に対して、通信要求の処理順が変更される可能性があり、そのまま従来の方式を適用できなくなる。

即ち、IPA法を一般的なネットワーク構成を持つ分散システムの性能解析に使用する為には、以下の問題点解決が必要である。

① 複数個の通信路(並列の道)がある時、状況に応じて複数個の選択技がある場合。

② 複数個の通信経路を介してシーケンシャルに通信が転送される場合。(直列の道)パラメータの値の変動により、要求(イベント)の発生時間が異なると通信状況が変化する事を考慮する必要がある。

5. 一般的なネットワークボロジを持つ分散システム性能解析方式

適用範囲を考慮した分散システム性能解析方式は以下の段階でなされる。

Step 1. 通信処理系列（典型的なpath）を求めるルール（一般的な処理系列を決定する為の規則）の抽出

Step 2. 適用範囲を考慮した性能評価計算

Step 3. 分散システムの総合的な性能評価

ネットワークの構造（あるいは通信方式）によって通信要求の通信経路がどのようになるか、という挙動の性質を推定した後、実際の値での解析をシステムティックに進めている。性能計算の際にその計算が有効である範囲を同時に求め、それを次の計算に活用している所に特徴がある。

Step 1 のイベントの発生系列を特定する為のルールを取り出す処理は定性的なイベント発生系列を推定する問題である。このアルゴリズムは以下の様になっている。

(1-1). 初期設定

通信要求(Event)を順次取り出し、各々の可能経路を求める。

(1-2). 各メディアのEvent発生系列の計算処理

(1-2-1). 次の要求Eventを取り出す。

(1-2-2). もし次のEventが無ければ(2)を終了する。

(1-2-3). 要求Eventに対して、以下の処理を行う。

(1-2-3-1). もし、可能経路が複数メディアをもつ並列のものであれば、各メディアに条件付きで処理がなされることを示すデータ（特別なイベントデータ）を追加する。

(1-2-3-2). もし、可能経路が直列経由のものであれば、処理開始時間の条件データを付け、順次該当のメディアにイベント要求を挿入する。

(1-2-3-3). もし、(2-3-1)(2-3-2)以外（可能経路が一個のメディア）であれば、そのメディアにイベントデータを追加する。

(1-2-4). (1-2-1)へ戻り1-2の処理を繰り返す。

ここでは、前章の2つの問題点が次にまとめられるような形式で解決されている。

① 並列結合の通信路をもつ場合

通信Eventの通信経路が変化する場合、ネットワークごとの通信Event Pathが変化する場合

があること（どういう条件の時に、どれが選択されるかということ）を示すデータを追加する。これは一種のルールであり、その条件がEventの発生条件に他ならない。ここで条件は通信処理の規則に左右され、その規則をそのままルール化してもよいが、ここでは、より一般的にこの展開では並列選択であることを、例えば（parallel EventNo）の様な形式のデータを単に付け加え、次の評価時に条件検査をし、Event発生系列を求めることとした。

② 直列結合の通信路をもつ場合

直列結合がある場合は、通信メディアを経由して転送される為、ある所の処理が終了した時点で、その終了時点を通信用Event発生時間として、新たに通信要求の列に乗せる。そこで処理発生時間の変動の可能性により処理順位が変動する相互依存性を考慮する。

例えば、メディアAからメディアBへ通信転送する時はメディアAでの処理終了時刻がメディアBの処理開始時刻となる。メディアAの処理遅れがそのままメディアBの処理遅れへと伝搬することになる。そこでこの直列結合の場合は通信処理開始時間が条件によって変動するという条件付きEvent発生ルールを追加する。

例えば以下の様な形式のデータが追加される。

(EventNo2 (EventNo1 anyplace))

これは、EventNo2はあるメディアでEventNo1の処理が終了した時に処理が開始されることを意味している。このルールがEventNo2が処理される通信メディアにセットされる。

次にStep 2では、Step 1で抽出されたデータから、ルールを展開し各メディアのイベントの発生系列を導出しその成立条件と性能評価計算をする部分である。ここで、実際の値（量）に基づき各メディアの性能評価を行う部分である。以下のステップにより処理される。

(2-1). シミュレーションによって実際の処理系列を計算する。ある通信形態が評価パラメータの値の変化に対してどの範囲まで同一形態を保っているのか付帯情報を持たず。

(2-2). (2-1)の条件の基で、IPA法による感度計算する。

(2-3). 成立範囲情報を基に新たなパラメータ変動範囲を決め、Step 2を繰り返し実行する。

(2-1)は、各通信要求の発生時間や処理単位時間（メッセージ長）を順次調べ、Step 1で作られたルールの中で条件を持つものに関しては、

経路の選択戦略等の条件に応じて、実現可能な通信Sample Event Pathを決定すると共に、以下に示すようにそのSample Event Pathの系列を持つ場合の評価パラメータの変動範囲を定める。

各メディア毎の評価パラメータの許容範囲は以下の様に定まる。

① 並列結合の通信路をもつ場合

通信戦略により、例えば、busyでないメディアの一つで処理がなされるようにし、そうでない場合は処理がなされない様にする。

この時選択されたメディアに於てそれまでの処理終了時刻が この処理要求の開始時刻に食い込まない様に評価パラメータの変動許容範囲が決まる。

② 直列結合の通信路をもつ場合

前の処理の終了時刻を新たな処理の通信開始時刻に設定し、他の通信要求の開始時間と比較して順位を定める。

この時順位が狂わない範囲に評価パラメータの変動許容範囲が決まる。。

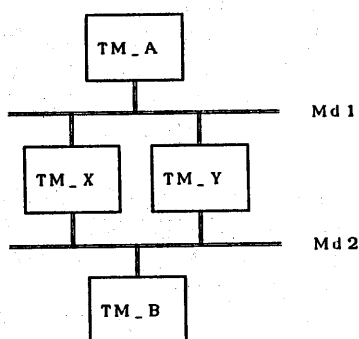
評価パラメータの許容範囲を決める条件は各々のメディア毎に、条件のAND即ち共通範囲によって決まる。

最後にStep3で総合的な判断をする。

6. 実行例

問題例として下図4に見られる様な、通信メディア2個 Md 1とMd 2、端末4台 TM_A, TM_B, TM_X, TM_Yを持つ分散システムの評価を扱う。

図4. 分散システム例



これは一般的な分散システムの特徴である並列結合と直列結合の2つの特徴をもっている。

実行例として、通信要求として、問題原因となった直列に端末を介して通信する場合と、並列にどちらが選ばれても良い場合を含む以下の6つの要求が発生したものとして、改善方式

を用いた解析を進める。

通信要求Eventの発生を以下の様に仮定する。
ここで矢印==>は通信方向を示す。

① TM_A == (Md 1) ==> TM_X

② TM_B == (Md 2) ==> TM_Y

③ TM_X ==> TM_Y

③a TM_X == (Md 1) ==> TM_Y

③b TM_X == (Md 2) ==> TM_Y

④ TM_B ==> TM_X ==> TM_A

④1 TM_B == (Md 2) ==> TM_X

④2 TM_X == (Md 1) ==> TM_A

⑤ TM_X == (Md 2) ==> TM_B

⑥ TM_Y == (Md 1) ==> TM_A

組合せ的には以下の様に、状況によって処理系列異なる処理系列が考えられる。

(1). ①②③a④1⑤④2⑥

(2). ①②③a④1⑤⑥④2

(3). ①②③b④1⑤④2⑥

(4). ①②③b④1⑤⑥④2

③に於て、Md 1とMd 2のどちらが選択されるかは一般的には通信方式に依存している。この実験では、空いている方を優先する。というルールで選択されるものとする。

その場合、処理効率の変化により①と②の処理実時間が異なり、Md 1とMd 2のどちらのメディアMdが選択されるかが異なることになる。

④に於て、直列的に伝達される時は、前の処理がどれだけ早く終わったかによって次の処理④1-2と同じ媒体(Md 1)を使用している⑥の処理が開始される順番が異なる可能性がある。

以上の観察からもわかる様に、媒体の効率の変化が、通信要求の処理の順番を変更する場合があります、その原因が、上で説明した並列結合と直列結合にある事がわかる。

前章で提案したアルゴリズムを用いて解析すると以下の様になる。

Step1によって、イベント発生ルールは以下の様になる。

Md 1 : : ①

(Pararell ③)

(④2 (④1 anyplace))

⑥

Md 2 : : ②

(Pararell ③)

④1

⑤

Step2によって、実際の処理時間を考慮してルールを展開した時、イベントの発生系列とその成立条件は、例えば以下の様に求まる。

Md 1. ①③⑥④2

Md 2. ②④1⑤

この時、解析条件としてMd 1の効率がM1からM1+ΔM1に変更されたものとする。

この時以下の条件が成立している必要がある。

Md 1で③が取られているということから、

$$X2 * M2 \geq X1 * (M1 + \Delta M1)$$

$$(X2 * M2 - X1 * M1) / X1 \geq \Delta M1$$

また、④1-2が⑥より後にあるということから、

$$X41 * M2 \geq X6 * (M1 + \Delta M1)$$

$$(X41 * M2 - X6 * M1) / X6 \geq \Delta M1$$

全体として評価パラメータM1の許容変動範囲はこれらの条件を重ね合わせることで、以下の様に決まる。

$$\min \{ (X2 * M2 - X1 * M1) / X1, (X41 * M2 - X6 * M1) / X6 \} \geq \Delta M1$$

この評価パラメータの許容変動範囲の基で先に求められた各メディアMd 1とMd 2のイベント発生系列に対しIPA法を適用され、IPAの解析結果と同時にその解析結果成立条件を明示することが可能になる。

7. あとがき

IPA法は解析対象の典型的な振舞い（イベントの発生系列）が与えられた場合に、それに基づいて評価パラメータの変動に対する影響を効率的に計算する方式である。従って複数のネットワークが互いに結合している様な分散システムの場合、互いの影響により、評価パラメータの変動によって振舞いに変更する可能性がある問題となる。

本稿では、その解決策として、分散システムの2つの形態を考慮することを提案し、イベントの発生系列の抽出と同時に、評価パラメータの変動挙動範囲を求めることで、IPA法が成立する評価パラメータの変動許容範囲を明確にする方式を提案した。

この改善方式によって、複数の通信路が互いに結合している様な一般的なネットワーク構成を持つシステムのIPA法による解析が、その適用条件を考慮して的確に行えることが期待できる。

一方、対象システムの挙動の影響が、IPA法の結果に直接左右するので、シミュレーションをより正確にする必要がある。

参考文献

- [1] Distributed Computer Systems impact on Management, Design, and Analysis
George A. Champine,
North-Holland Publishing Company, 1980
- [2] Dynamics of Discrete Event Systems
Edited by Y.-C. Ho, Proceedings of the IEEE, vol.77, no.1, p.3-p.6, jan.1989
- [3] Perturbation Analysis: The State of the Art and Research Issues Explained via the GI/G/1 Queue
Ranjan Suri, Proceedings of the IEEE, vol.77, no.1, p.114-p.137, jan.1989
- [4] Sample Path Properties of Timed Discrete Event System
Christos G. Cassandras, S.G. Strickland
Proceedings of the IEEE, vol.77, no.1, p.114-p.137, jan.1989
- [5] Performance Evaluation and Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems
Yu-chi Ho, IEEE Tr. Auto. Con., AC-32., no.7, p.563-p.572, 1987
- [6] An Event Domain Formalism for Sample Path Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems
Christos G. Cassandras and Yu-chi Ho, IEEE Tr. Auto. Con., AC-30., no.12, p.1217-p.1221, 1985
- [7] IPA法を用いた分散システム性能評価
第41回(平成2年後期)情報処理学会全国大会, Ricoh R&D Center 矢野隆則
- [8] The Predictability of Discrete Event Dynamic Event Systems
Xi-ren Cao, IEEE Tr. Auto. Con., AC-34., no.11, p.1168-p.1171, 1989
- [9] Extensions of Infinitesimal Perturbation Analysis
Yu-Chi Ho, Shu Li, IEEE Tr. Auto. Con., AC-33., no.5, p.427-p.438, 1988
- [10] Smoothed(Conditional) Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamical Systems
Wei-Bo Gong, Yu-Chi Ho, IEEE Tr. Auto. Con., AC-32., no.10, p.858-p.866, 1987