

定性推論を導入した待ち行列ネットワークのボトルネック診断と改善法

沢村 淳 (上智大学大学院・理工学研究科・機械工学専攻)
志田 圭介 (上智大学理工学部機械工学科)
本位 田真一 (佛東芝システム・ソフトウェア技術研究所)
伊藤 潔 (上智大学・理工学部・一般科学研究室・情報科学部門)

本稿では、待ち行列ネットワークの性能パラメータの測定データを、定性推論、ヒューリスティクス、定量推論の組み合わせでチューニングする“ボトルネック診断エキスパートシステム(Bottleneck Diagnosis Expert System: BDES)”と“ボトルネック改善エキスパートシステム(Bottleneck Improvement Expert System: BIES)”を述べる。BDESは、ネットワークの部分形状に関する知識と、その部分形状内の性能パラメータ間の制約に関する知識とを踏まえて導かれた定性式をもち、更にこの定性式の適用順序制御に関する知識(ヒューリスティクス)をもつ。BDESは1つのボトルネック窓口の改善プランを出力する。BIESは、この改善プランを入力として、その窓口とこれに影響を受ける全ての性能パラメータの値を定量推論する自動チューニングの知識をもつ。これらは、Prolog言語を用いてインプリメントされた。

Bottleneck Diagnosis and Improvement Method for Queueing Network
on the basis of Qualitative Reasoning

Jun SAWAMURA*, Keisuke SHIDA*, Shinichi HONIDEN**
and Kiyoshi ITOH*

*: Faculty of Science and Technology, Sophia University,
Kioi-cho 7-1, Chiyoda-Ku, Tokyo 102, Japan

** : Systems & Software Engineering Laboratory, Toshiba Corporation
Yanagi-cho 70, Saiwai-ku, Kawasaki 210, Japan

This paper describes Bottleneck Diagnosis Expert System (BDES) and Bottleneck Improvement Expert System (BIES). BDES and BIES carry out parameter tuning for performance datas, with the combination of qualitative reasoning, heuristics and quantitative reasoning, in order to remove bottlenecks of queueing networks. The qualitative equations and the control mechanism of their application are built in BDES on the basis of the heuristic knowledges on substructures of networks and on performance parameter constraints. BDES can output several improvement plans for one bottleneck server. With the use of one of these plans, BIES can carry out automatic parameter tuning to remove the bottleneck by quantitative reasoning. BDES and BIES are implemented in Prolog language.

1 はじめに

システムの性能パラメータチューニングは、対象システムの改善のための重要な作業である。測定と評価を繰り返して、対象システムに悪影響を及ぼすものとその要因を解明し改善する作業は、一般に手間がかかる。また、対象システムの規模が大きく複雑であれば、改善の方策も数多く存在する。さらに、ある箇所を改善すると周辺への影響も大きい。

本研究では、待ち行列ネットワーク[RL75]の形態にモデル化できるシステムを対象システムとし、対象システムに悪影響を及ぼすものとして稼働率が過大な窓口（ボトルネック窓口）を挙げ、その要因を解明し改善を行う。ある窓口の能力や到着量の増減という改善でその稼働率が変化すると、周辺に影響が出て時には他の窓口がボトルネックとなる。このため、エキスパートシステムの導入は有効である。

本研究では、待ち行列ネットワークの性能パラメータの測定データを、定性推論[ART84]、ヒューリスティクス、定量推論の組み合わせでチューニングする“ボトルネック診断エキスパートシステム(Bottleneck Diagnosis Expert System: BDES)”とボトルネック改善エキスパートシステム(Bottleneck Improvement Expert System: BIES)”を開発した。

図1に我々の処理の流れを示す。ネットワークの形状は固定パラメータで他は可変パラメータとする。サービス率は各窓口の能力として測定前に与えられるが、チューニング後に可変である。

ブロック1の測定後、ブロック2で稼働率の過大なボトルネック窓口群が列挙される。評価者はこのうち1つのボトルネック窓口を選択する。BDESは、ネットワークの部分形状に関する知識と、その部分形状内の性能パラメータ間の制約に関する知識とを踏まえて導かれた定性式をもつ。更にこの定性式の適用順序制御に関する知識をもつ。BDESで用いる性能パラメータは、ばらつきなどの値を用いない平均値のみの測定上簡単なデータである。

ブロック3で、このBDESにより、1つのボトルネック窓口の複数の改善プランが列挙される。評価者はこのうち1つの改善プランを選択する。BIESは、その窓口とこれに影響を受ける全ての性能パラメータの値の自動チューニングに関する知識をもつ。

ブロック4で、このBIESによりあるボトルネックが改善される。ブロック4からブロック2に戻るフィードバックを繰り返すと、ネットワーク内の全てのボトルネック窓口とこれに影響を受けていた全ての性能パラメータの自動チューニングが行なわれる。

ブロック4からブロック1のフィードバックは、自動チューニング後の改善されたサービス率や分岐確率などのパラメータを使って、再度パラメータの測定を行なうことを示している。

後の例証で示す通り、この再度の測定結果を調べると待ち行列ネットワーク内のボトルネックがかなり良好に改善されている。

2 各種性能パラメータとボトルネックの定義

単一窓口による待ち行列に対して、 λ , μ , t , ρ を以下のよう

に定義し、各々の関係を図2, 図3に示す。
 λ : 単位時間当りに窓口に着するエンティティの平均個数
 (到着率: arrival rate)

μ : 単位時間当りに1つの窓口で処理できるエンティティの平均個数
 (サービス率: servicing rate)

t : 単位時間当りに1つの窓口から出て来るエンティティの平均個数
 (スループット: throughput)

ρ : 単位時間当りに1つの窓口が実際に処理するエンティティの平均個数
 (稼働率: utilization rate)

待ち行列ネットワークでは複数の窓口が結合する。2つの窓口が直列に結合するときには、前段の窓口からのスループット t_1 が、後段の窓口への到着率 λ となる。2つの窓口からのスループット t_1 と t_2 が合流して後段の窓口に入るときは、 t_1 と t_2 の和が後段の窓口への到着率となる。ある窓口 s_1 のスループット t_1 が2つの

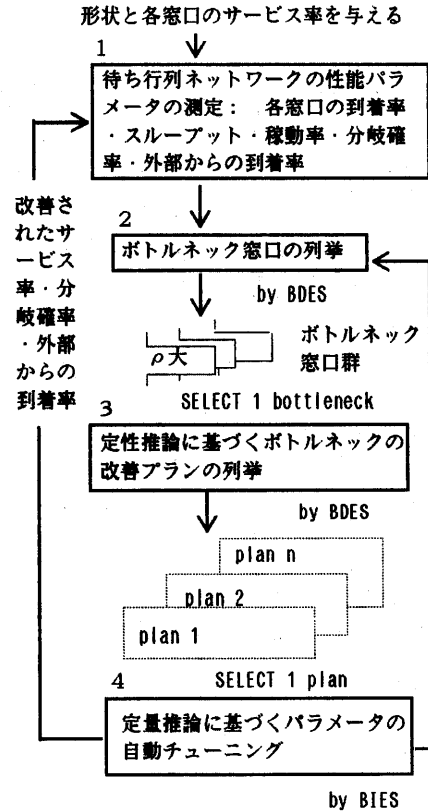
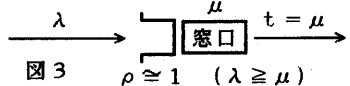
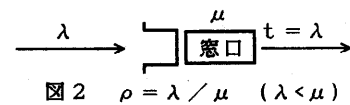


図1 BDES&BIESによる評価サイクル



窓口 s_2 , s_3 に分岐するときには、その分岐確率 r , $1-r$ を定義する。 s_1 と s_2 への到着率は $r t_1$, $(1-r) t_1$ となる。

本稿の待ち行列ネットワークの形状は固定パラメータ（診断後に変更不可能なパラメータ）とし、 λ , μ , t , ρ , r は可変パラメータ（診断後に変更可能なパラメータ）とする。

その稼働率が限りなく1に近い窓口がボトルネック(bottleneck)である。その待ち行列長は無限に成長する恐れがある。

稼働率が過大な窓口はボトルネックとなる可能性がある。窓口の到着率やサービス率に大きなばらつきがある場合、稼働率が1に近くなくても待ち行列が時には急激に増加する。これを考慮して、稼働率が0.7を越える窓口はボトルネックの可能性があると看做する。

稼働率が他の窓口と比べて非常に低い窓口はサービスの度合いが相対的に小さく、他に悪影響を与えてその別の窓口はボトルネックの可能性を与える。このような窓口も、たとえば稼働率が0.

3より低いことを目安に初期診断する。

知識1：ボトルネック箇所の初期診断のための知識

稼働率0.7をボトルネックランドマーク(BL)とすると、

- $\rho \geq BL$: ボトルネックの可能性ある。
- $\rho < BL$: 周囲の別の窓口に対して悪影響の可能性ある。
- これを定性推論記法で表現すると、
- $\rho = +$: ボトルネックの可能性ある。
- このとき $d\rho = +$ と考える。
- $\rho = -$: 周囲の $\rho = +$ を発見するために用いられる。

3 単一待ち行列の定性挙動式と定性改善式

単一窓口の挙動の定性挙動式を述べる。

a) $\rho < BL$ のとき ($\lambda < \mu$ のとき: 図2参照)

- $\rho = -$ (ρ がBLより小さい)
- $d\rho = d\lambda$ (λ を増加すると ρ も増加する)
- $dt = d\lambda$ (λ を増加すると t も増加する)
- $-d\rho = d\mu$ (μ を増加すると ρ は減少する)
- $dt = 0 \cdot d\mu$ (μ を増加しても t は変化しない)

b) $\rho > BL$ のとき ($\lambda \geq \mu$ のとき: 図3参照)

- $\rho = +$ (ρ がBLより大きい)
- $-d\rho = -d\lambda$ (λ を減少すると ρ も減少する)
- $dt = 0 \cdot (-d\lambda)$ (λ を減少しても t は変化しない)
- $-d\rho = d\mu$ (μ を増加すると ρ は減少する)
- $dt = d\mu$ (μ が増加すると t も増加する)

c) $\rho \approx BL$ のとき ($\lambda \approx \mu$ のとき)

- $\rho = 0$ (ρ がBLにほぼ等しい)
- $-d\rho = -d\lambda$ (λ を減少すると ρ も減少する)
- $-dt = -d\lambda$ (λ を減少すると t は減少する)
- $-d\rho = d\mu$ (μ を増加すると ρ は減少する)
- $dt = 0 \cdot d\mu$ (μ を増加しても t は変化しない)

d) $q \geq QL$ のとき

- $q = +$ (q がQLより大きい)
- $d\rho = dq$ (q が増加すると ρ も増加する)
- $-dq = d\mu$ (μ を増加すると q は減少する)
- $-dq = -d\lambda$ (λ を減少すると q は減少する)

単一窓口のボトルネックの定性改善式は次のようになる。

(1) $\rho > BL$ の場合

- 定量的状態: $\rho > BL$
- 定性的状態: $\rho = +$, $d\rho = +$ (ρ が大で, ρ が増加)
- 改善目標: $d\rho = -$ (ρ を減少)
- 定性改善式(1): $-d\rho = -d\lambda$, $dt = 0 \cdot (-d\lambda)$
(λ を減少すると ρ が減少, $dt = 0 \rightarrow$ 副次効果なし)
- 定性改善式(2): $-d\rho = d\mu$, $dt = d\mu$
(μ を増加すると ρ が減少, t が増加 $\rightarrow$ 副次効果あり)

(2) さらに q を考慮した場合

(2-1) $q > QL$, $\rho \geq BL$ の場合は, (1) を適用。

(2-2) $q > QL$, $\rho < BL$ の場合

- 定量的状態: $q > QL$
- 定性的状態: $q = +$, $dq = +$ (q が大で, q が増加)
- 改善目標: $dq = -$ (q を減少)
- 定性改善式(1): $-d\rho = -d\lambda$, $-d\rho = -dq$, $-dq = -d\lambda$
 $dt = 0 \cdot d\lambda$
(λ を減少すると ρ と q が減少, t は不変 $\rightarrow$ 副次効果なし)
- 定性改善式(2): $-d\rho = d\mu$, $-d\rho = -dq$, $-dq = d\mu$,
 $dt = d\mu$
(μ を増加すると ρ と q が減少, t が増加 $\rightarrow$ 副次効果あり)

図4に本稿で扱う例題待ち行列ネットワークを示す。図5は本節の単一窓口の定性挙動式と定性改善式の各窓口への適用を示す。ボトルネックの可能性のある窓口には両方が適用されている。

式の個数は、図4に対しては約250本である。ボトルネックの改

A) 窓口20について

- 定量的状態: $\rho_{20} > BL$
- 定性的状態: $\rho_{20} = +$, $d\rho_{20} = +$
- 改善目標: $d\rho_{20} = -$
- 定性挙動式: $-d\rho_{20} = -dt_{15,20}$, $dt_{20} = 0 \cdot (-dt_{15,20})$
 $-d\rho_{20} = d\mu_{20}$, $dt_{20} = d\mu_{20}$
- 定性改善式: $-d\rho_{20} = -dt_{15,20}$
 $0 \cdot$
 $-d\rho_{20} = d\mu_{20}$, $dt_{20} = d\mu_{20}$

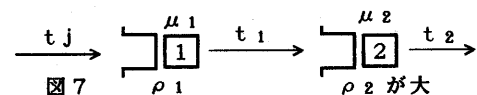
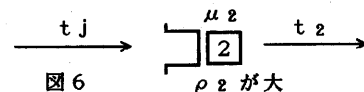
B) 窓口36について

- 定量的状態: $\rho_{36} < BL$, $q_{36} > QL$
- 定性的状態: $\rho_{36} = -$, $q_{36} = +$, $dq_{36} = +$
- 定性挙動式: $d\rho_{36} = dq_{36}$, $-dq_{36} = -dt_{35}$
 $-dq_{36} = -dt_{35}$

C) 窓口15について

- 定量的状態: $\rho_{15} < BL$
- 定性的状態: $\rho_{15} = -$, $d\rho_{15} = -$
- 定性挙動式: $d\rho_{15} = dt_{12}$, $d\rho_{15} = dt_{11,15}$
 $dt_{15} = dt_{12}$, $dt_{15} = dt_{11,15}$
 $-d\rho_{15} = d\mu_{15}$, $dt_{15} = 0 \cdot d\mu_{15}$

図5 単一窓口の定性式の例



善を行なうときには、これらの式以外に窓口間の結合情報や分岐確率などの情報を与えなければならない。これらを全て集めて定性挙動推論により解くと、状態数の爆発が起きる。

このような窓口毎の立式ではなく、窓口間の結合情報を取り込むために、待ち行列の部分形状を踏まえて部分形状毎の立式を行い、式の個数を減らす。その際にさらにこの部分形状の内部の分岐確率を取り込む。

4 部分形状に関する知識とボトルネック改善のための定性改善式

図6に示す通り、窓口にボトルネックがあると診断された場合、 t_j と μ_2 のバランスがその要因である。しかし、その根本の要因は簡単にはわからない。このため、たとえば図7に示す通り1つ上流の窓口の μ_1 , t_j , ρ_1 を調査したり、また、時には下流に進んでボトルネックの要因を得る。

まず、改善のための知識を、 ρ の値によって、ボトルネックの可能性があると診断された場合と、周囲の別の窓口に悪影響の可能性があると診断された場合とに分類する。次に、各々の場合に対して待ち行列の形状毎に、改善の知識を分類する。各知識の後に定性式を述べる(紙面の制約により、その導出は省略)。

4.1 ある窓口にボトルネックの可能性があると診断された場合

知識2~9は、ボトルネックの可能性があると診断された窓口を中心に、窓口の接続の形状やパラメータの値の関係を手がかりとして、その上流の窓口や下流の窓口を調査する。これを順次、上流や下流に進んで適用することにより、ボトルネックの要因を待ち行列ネットワーク全体の中から発見する。

窓口にボトルネックの可能性があると診断された場合に、知識2でその直接的な要因と下流を調べる。

知識2：ある窓口にボトルネックの可能性がある場合の直接的な要因と下流診断による改善

1) 直接的な要因はその到着量 λ とサービス率 μ のバランス (λ が過大あるいは μ が過小)と診断。

2) μ の改善について(下流診断の知識)。

ボトルネックの改善のために μ を増加すると、その窓口のスループットが増加し、下流の窓口群の稼働率や待ち行列長に影響を及ぼす。このため μ を改善するための知識を次のように分類する。

2-1) その窓口が最終窓口ならば、 μ を増加。

2-2) その窓口の下流の窓口群の全ての稼働率がその窓口の ρ よりかなり小さく、平均待ち行列長が過大でなければ、 μ を増加。

2-3) その窓口の下流の窓口群の中に稼働率がその窓口と同等なものがある場合、または、平均待ち行列長が過大なものがある場合、下流の窓口のサービス率を全て増加することで、 μ を増加。

1) 図6より・定性的状態: $\rho_2 = +$ 。

・定性改善式: $-d\rho_2 = -dt_j, -d\rho_2 = d\mu_2$ 。

2) $d\mu_2 = +$ について ($dt_j = -$ については知識3~9適用)

図8より、定性改善式は、 $-d\rho_2 = d\mu_2, dt_2 = d\mu_2$

2-1) $t_2 = t_{out}$ の場合、定性改善式: $-d\rho_2 = d\mu_2$

2-2) $\rho_3 < BL, q_3 < QL$ の場合

・定性的状態: $\rho_3 = -, d\rho_3 = -, q_3 = -$

・定性改善式: $-d\rho_2 = d\mu_2, dt_3 = d\mu_2$

[$dt_3 = d\mu_{downstream} \mid \rho_{downstream} = +$]

2-3) $\rho_3 > BL$ or $q_3 > QL$ の場合

・定性的状態: $\rho_3 = +, d\rho_3 = +, q_3 = +, dt_2 = +$

・定性改善式: $-d\rho_2 = d\mu_2, -d\rho_3 = d\mu_3, dt_3 = d\mu_3$

[$dt_3 = d\mu_{downstream} \mid \rho_{downstream} = +$]

上の知識2の適用後、その窓口とその直上流の窓口との接続関係により次の上流診断の知識3~9を適用する。

知識3: 直列型の場合 図7に示す直列型で窓口2にボトルネックの可能性があると診断され知識2が適用された後、

1) $\rho_1 \cong \rho_2$ なら、 t_1 の減少のためには t_j の過大さの改善が必要。→ t_j に対して知識3~9を適用。

2) $\rho_1 \ll \rho_2$ なら、 t_1 の減少のためには t_j の過大さの改善が必要。→ t_j に対して知識3~9を適用。

3) 1), 2) より、 ρ_1, ρ_2 の大小にかかわらず、 t_1 減少のためには t_j の過大さの改善が必要。

4) $t_j = t_{in}$ (システムへの入力) の場合は知識14を適用。

根拠: 1) μ_1 が増加すると t_1 が更に増加。 μ_1 が減少すると窓口1の待ち行列が増加。∴ ρ_2 がボトルネックとなる要因は、 t_j が過大であると診断。

2) $t_j = t_1$ である。 t_j が増加すると t_1 も増加し、窓口2の待ち行列が増加。 t_j が減少すると t_1 も減少し、 ρ_2 が減少。

∴ ρ_2 がボトルネックとなる要因は、 t_j が過大であると診断。

1)・定量的状態: $\rho_1 > BL, \rho_2 > BL$

・定性的状態: $\rho_1 = +, d\rho_1 = +, \rho_2 = +, d\rho_2 = +,$

$t_1 = +, dt_1 = +,$

・定性改善式: $-d\rho_1 = -dt_j, -d\rho_2 = -dt_j$

2)・定量的状態: $\rho_1 < BL, \rho_2 > BL$

・定性的状態: $\rho_1 = -, d\rho_1 = -, \rho_2 = +, d\rho_2 = +, t_1 = +,$

$dt_1 = +$

・定性改善式: $-d\rho_2 = -dt_j$

3)・定量的状態: $t_1 = +, dt_1 = +$ 。定性改善式: $-dt_1 = -dt_j$ 。

知識4: 合流型の場合 図9に示す合流型で窓口3にボトルネックの可能性があると診断され知識2の適用後、

1) $t_1 \gg t_2$ の場合、 t_1 の方に大きな原因があると診断。

→ t_1, ρ_3 に対して知識3を適用。

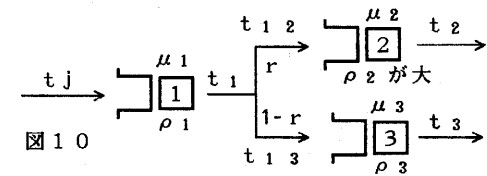
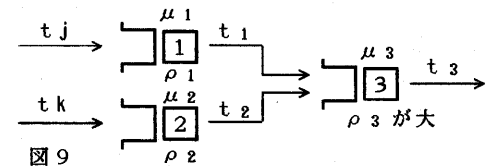
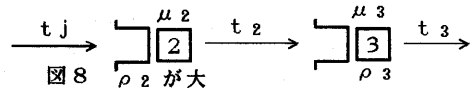
2) $t_1 \cong t_2$ の場合、 t_1 と t_2 が同程度に原因となる。

→ t_1, ρ_3 に対して、および t_2, ρ_3 に対して知識3を適用。

1)・定量的状態: $t_1 > t_2, \rho_3 > BL$

・定性的状態: $\rho_3 = +, d\rho_3 = +, t_1 = +, dt_1 = +$

・定性改善式: $-d\rho_3 = -dt_1$



2)・定量的状態: $t_1 \cong t_2, \rho_3 > BL$

・定性的状態: $\rho_3 = +, d\rho_3 = +, t_1 = +, dt_1 = +,$

$t_2 = +, dt_2 = +,$

・定性改善式: $-d\rho_3 = -dt_1, -d\rho_3 = -dt_2$

知識5: 分岐型の場合 図10に示す分岐型で、窓口2にボトルネックの可能性があると診断され知識2を適用後、

1) $\rho_3 \cong \rho_2$ の場合

1-1) 知識2により窓口3の下流の窓口群を調査し、 μ_3 が改善不可能と判断された場合には、 t_1 が過大と診断。

→ t_1, ρ_2 に対して知識3を適用。

1-2) 知識2により μ_3 が改善可能と判断された場合には、 μ_3 を増加、 r を減少、 $1-r$ を増加。

2) $\rho_3 \ll \rho_2$ の場合

知識2により t_3 が増加可能と判断された場合には、窓口3の下流のいくつかの窓口のサービス率を増加、 r を減少、 $1-r$ を増加。

1-1)・定量的状態: $\rho_3 > BL, \rho_2 > BL$

・定性的状態: $\rho_3 = +, d\rho_3 = +, \rho_2 = +, d\rho_2 = +,$

$t_{12} = +, dt_{12} = +$

・定性改善式: $-d\rho_2 = -dt_1, -d\rho_3 = -dt_1$

1-2)・定量的状態: $\rho_3 > BL, \rho_2 > BL$

・定性的状態: $\rho_3 = +, d\rho_3 = +, \rho_2 = +, d\rho_2 = +,$

$t_{12} = +, dt_{12} = +$

・定性改善式: $-d\rho_2 = -dr, -d\rho_3 = d\mu_3, dt_3 = d\mu_3$

2)・定量的状態: $\rho_3 < BL, \rho_2 > BL$

・定性的状態: $\rho_3 = -, d\rho_3 = -, \rho_2 = +, d\rho_2 = +,$

・定性改善式: $-d\rho_2 = -dr, dt_3 = -dr,$

[$dt_3 = d\mu_{downstream} \mid \rho_{downstream} > BL$]

知識6: ループ部からの出力量を改善するためにその分岐確率を変更することは実際上の意味がない。

根拠: 図11に示す通り、稼働率が過大な窓口3に対する窓口2からの到着量が確率分岐であり、分岐の他方がループするためのものである場合、窓口3への到着量を改善するために $1-r$ を減少させる診断は、この分岐確率の変更はフィードバック量の変更となり、対象システムの機能を変えてしまうことになる。

・定量的状態: $\rho_3 > BL$

・定性的状態: $\rho_3 = +, d\rho_3 = +, t_{23} = +, dt_{23} = +$

・定性改善式: $-dt_{23} \neq dr$

知識7: ループ部からの出力を受けている窓口にボトルネックの可能性があると診断された場合、知識2が適用された後、ループ部からの出力量を改善するために、ループ部への到着量と、ループ部

からの出力を受けている窓口の稼働率を使って運行可能。

根拠: 図11において、ループ内の窓口群の稼働率があまり過大でないときは、ループ部からの出力量はループ部への到着量に等しい。このため、ループ部からの出力量を改善する必要がある時は、その到着量を改善する。図11の窓口3にボトルネックの可能性があると診断され、知識2が適用された後、 t_{23} を改善するために、 ρ_3 と t_j を使ってさらに運行するように知識7は診断する。

- ・定量的状態: $\rho_3 > BL$
- ・定性的状態: $\rho_3 = +$, $d\rho_3 = +$, $t_{23} = +$, $dt_{23} = +$
- ・定性改善式: $-d\rho_3 = -dt_j$

知識3: 合流窓口への到着量が上流の窓口の分岐出力である場合

1) 到着量がループ部からの確率分岐出力である場合

図12に示す通り、窓口5がループ部からの出力の場合、

1-1) $t_{57} > t_3$ の場合、 t_{57} の方に原因。

→ t_{57} , ρ_7 に対して知識7を適用。

1-2) $t_3 > t_{57}$ の場合、 t_3 の方に原因。

→ t_3 , ρ_7 に対して知識3を適用。

1-3) $t_{57} > t_3$, あるいは $t_{57} = t_3$ の場合、

→ t_3 , ρ_7 に対して知識7を適用。または

→ t_{57} , ρ_7 に対して知識7を適用。

注: 図12において、窓口3が窓口7以外の他の窓口へ分岐出力している場合、1-2), 1-3)は、 t_3 , ρ_7 に対して知識5を。

1-1)・定量的状態: $t_{57} > t_3$, $\rho_7 > BL$

・定性的状態: $\rho_7 = +$, $d\rho_7 = +$, $t_{57} = +$, $dt_{57} = +$

・定性改善式: $-d\rho_7 = -dt_{57}$

1-2)・定量的状態: $t_3 > t_{57}$, $\rho_7 > BL$

・定性的状態: $\rho_7 = +$, $d\rho_7 = +$, $t_3 = +$, $dt_3 = +$

・定性改善式: $-d\rho_7 = -dt_3$

1-3)・定量的状態: $t_{57} \geq t_3$, $\rho_7 > BL$

・定性的状態: $\rho_7 = +$, $d\rho_7 = +$, $t_{57} = +$, $dt_{57} = +$

$t_3 = +$, $dt_3 = +$

・定性改善式: $-d\rho_7 = -dt_3$, $-d\rho_7 = -dt_{57}$

2) 到着量の方が外部入力である場合

図13に示す通り、窓口2への1つの到着量 t_g が外部入力の場合、

→ t_g と t_{12} の大小に関わらず、外部入力 t_g を改善。あるいは

→ t_g は不変として、 t_{12} , ρ_2 に対して知識5を適用。

根拠: 図13において、より局所的に窓口2のボトルネックを改善する場合、外部入力 t_g を改善した方がよい。しかし、外部入力を変更できない場合は、 $t_g > t_{12}$ の場合でも、 t_{12} , ρ_2 を改善。

2)・定量的状態: $\rho_2 > BL$

・定性的状態: $\rho_2 = +$, $d\rho_2 = +$, $t_g = +$, $dt_g = +$

$t_{12} = +$, $dt_{12} = +$

・定性改善式: $-d\rho_2 = -dt_g$, $-d\rho_2 = -dt_{12}$

3) 診断窓口がループ部に含まれる場合 (図14参照)

図14に示す通り、窓口4がループ内にある場合、同じループにはない上流の窓口1の方へ運行。→ t_{14} , ρ_4 に対して知識5を適用。

・定量的状態: $\rho_4 > BL$

・定性的状態: $\rho_4 = +$, $d\rho_4 = +$, $t_5 = +$, $dt_5 = +$

$t_{14} = +$, $dt_{14} = +$

・定性改善式: $-d\rho_4 = -dt_{14}$

4) 合流窓口への到着量が上流の窓口の分岐出力であり、その上流窓口の別の分岐出力が、ループ部の到着量となっている場合

図15に示す通り、窓口1の窓口3以外への分岐出力 $t_1 r_1$ が窓口5, 6を含むループ部の到着量となっている場合、

4-1) $t_2 r_2 > t_1(1-r_1)$ の場合、 t_{23} , ρ_3 に対して運行。

→ t_{23} , ρ_3 に対して知識5を適用。

4-2) $t_1(1-r_1) > t_2 r_2$ の場合、 t_{13} , ρ_3 に対して運行。

→ t_{13} , ρ_3 に対して知識5を適用。

4-3) $t_1(1-r_1) > t_2 r_2$, $t_1(1-r_1) \approx t_2 r_2$ の場合、

→ t_{23} , ρ_3 に対して知識5を適用。または

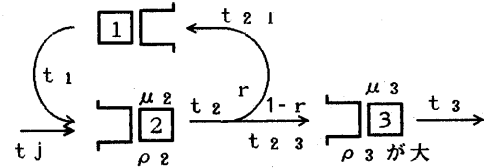


図 1 1

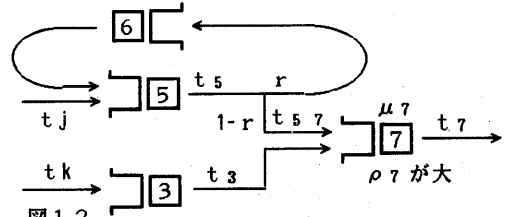


図 1 2

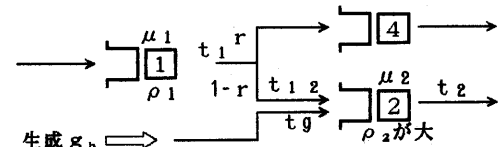


図 1 3

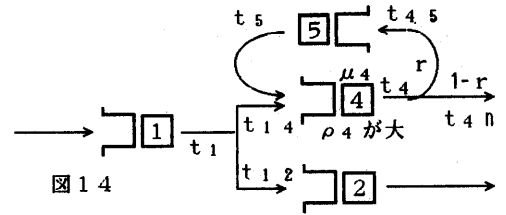


図 1 4

→ t_{13} , ρ_3 に対して知識5を適用。

根拠: より局所的に ρ_3 を改善するためには、 t_{23} , ρ_3 に対して運行した方がよい。なぜなら、 t_{13} , ρ_3 に対して知識5を適用して運行すると、ループ部の到着量を変更することになり、ループ部内の全ての窓口に影響を及ぼすことになるためである。

4-1)・定量的状態: $\rho_3 > BL$, $t_{23} > t_{13}$

・定性的状態: $\rho_3 = +$, $d\rho_3 = +$, $t_{23} = +$, $dt_{23} = +$

・定性改善式: $-d\rho_3 = -dt_{23}$

4-2)・定量的状態: $\rho_3 > BL$, $t_{13} > t_{23}$

・定性的状態: $\rho_3 = +$, $d\rho_3 = +$, $t_{13} = +$, $dt_{13} = +$

・定性改善式: $-d\rho_3 = -dt_{13}$

4-3)・定量的状態: $\rho_3 > BL$, $t_{13} \geq t_{23}$

・定性的状態: $\rho_3 = +$, $d\rho_3 = +$, $t_{13} = +$, $dt_{13} = +$

$t_{23} = +$, $dt_{23} = +$

・定性改善式: $-d\rho_3 = -dt_{13}$, $-d\rho_3 = -dt_{23}$

5) その他の場合 (図16参照)

5-1) $t_2 r_2 > t_1(1-r_1)$ の場合、 $t_2 r_2$ の方に原因。

→ t_{23} と ρ_3 に対して知識5を適用。

5-2) $t_2 r_2 < t_1(1-r_1)$ の場合、 $t_1(1-r_1)$ の方に原因。

→ t_{13} と ρ_3 に対して知識5を適用。

5-3) $t_2 r_2 \approx t_1(1-r_1)$ の場合、 $t_2 r_2$ と $t_1(1-r_1)$ が同程度に原因。→ t_{23} と ρ_3 , かつ t_{13} と ρ_3 に対して知識5を適用。

5-1)・定量的状態: $\rho_3 > BL$, $t_{23} > t_{13}$

・定性的状態: $\rho_3 = +$, $d\rho_3 = +$, $t_{23} = +$, $dt_{23} = +$

・定性改善式: $-d\rho_3 = -dt_{23}$


```

BDES: procedure
  ρが過大・過小の窓口から知識1と知識10
  ~13を使ってボトルネック診断候補を作成;
  while 診断候補がある かつ 続行指示
  do begin
    ユーザが診断候補を1つ選ぶ;
    知識2を使って下流診断;
    while バックトラックスタックが空でない
    かつ 続行指示
    do 改善策発見推論;
  end
end BDES
改善策発見推論: procedure
  上流形状調査;
  case 4
    合流型: 合流型推論;
    合流分岐型: 合流分岐型推論;
    直列型: 直列型推論;
    分岐型: 分岐型推論;
  end
  改善策発見推論;
end 改善策発見推論
直列型推論: procedure
  if 到着量が外部入力
  then begin
    改善策提示;
    全ての改善策発見推論がfail;
  end;
  知識3を使って改善;
end 直列型推論
分岐型推論: procedure
  知識5, 6, 7, 9を使って改善;
end 分岐型推論
合流型推論: procedure
  知識4を使って改善;
  parabegin (直上流窓口の性質)
    {一方を選択, 他方はバックトラック
    スタックにプッシュ}
    : 直列型推論;
    : 直列型推論;
  paraend
end 合流型推論
合流分岐型推論: procedure
  知識6~9を使って改善;
  parabegin (直上流窓口の性質)
    {一方を選択, 他方はバックトラック
    スタックにプッシュ}
    : 直列型推論 (あるいは分岐型推論);
    : 分岐型推論;
  paraend
end 合流分岐型推論

```

図2-1 定性式適用順序の制御

より、サービス率、到着率、分岐確率がチューニングされる。その結果、スループットも変化する。これは下流の窓口の到着率に影響を与えるため、上流から下流へ順次この計算式を適用する定量推論を行なう。

7 実行例

図4の待ち行列ネットワークには、シミュレーションパッケージによって測定した性能パラメータが示されている。BDESとBIESによるチューニングを3回繰り返してボトルネックを改善した例を図22(a)~(f)に示す。

図22(a)には、ボトルネック窓口s20に対する7個の改善プランがある。プラン1は、s20の改善のために、s20自体のサービス率の他に、s27, s28, s40のサービス率も増加させるという診断結果を示

している。BDESによるボトルネック診断はこのように局所的ではなく広域的である。他のパターンも同様であり、その中には分岐確率の改善や外部入力の改善などが含まれる。

図22(g)には、BDESとBIESによる改善後の窓口の稼働率が示され、さらに改善後のパラメータを使って再度シミュレーションによる測定を行なって得た稼働率が示されている。稼働率は、0.7以下にはなっていないが、パラメータの平均値のみを用いたBDESとBIESによる改善がかなり良好であることが示されている。

再測定時の稼働率を0.7以下にするためには、BIESの定量改善式適用の際に、待ち行列長の長さによって改善係数を変えるなどの考慮が必要である。

8 おわりに

本稿では、定性推論、ヒューリスティクス、定量推論を組み合わせて一般的な待ち行列ネットワークのボトルネック診断方法を考察し、このための知識、BDESとBIESおよびその実行例を示した。

BDESは改善すべきパラメータ増減という形式で定性的な診断を行う。BIESは各パラメータの値の増減量を定量的に出力する。このため図1に示す測定を行なう回数を減らして効率の向上が図れる。

本手法をより実用的なものとするためには、待ち行列ネットワークにモデル化できる対象システム（例えば、計算機ネットワーク、生産ライン）毎のより専門的な詳細化した知識を導入する必要がある。

ボトルネック箇所の初期診断の知識として稼働率の目安を一律に0.7以上とした。対象システムや構成要素の種類によって異なる場合がある。例えば、計算機ネットワークではCPUは0.7以上とするがチャネルは0.2以上を目安とする場合がある。このようにより専門的な知識の導入を検討しなければならない。

あるパラメータを固定パラメータ（変更が許されないパラメータ）と指定すれば、BDESの出力する改善パターンにはそのようなパラメータの増減の指示を含めないなどの考慮も必要である。

参考文献

- [ART84] Artificial Intelligence, Vol.24, (1984).
- [KLE75] Kleinrock, L.: Queueing Systems, John Wiley & Sons, Inc., (1975).

待ち行列ネットワーク“ng4”のボトルネックを診断します。

稼働率が最大となる窓口の窓口名と稼働率を出力します。

(s40 0.93)

稼働率が最小となる窓口の窓口名と稼働率を出力します。

(s13 0.10)

稼働率が0.9以上の窓口の窓口名と稼働率を出力します。

(s40 0.93)

稼働率が0.7以上の窓口の窓口名と稼働率を出力します。

(s12 0.88) (s14 0.80) (s20 0.85)

(s27 0.76) (s28 0.83)

???診断する窓口名を入力してください。: s20.

[下流との接続] s20の直下流には2個の窓口があり、さらに下流には18個の窓口があります。

[s20のサービス率増加について] 直下流の窓口の稼働率が0.7未満なので、s20のサービス率を増加できる可能性があります。さらに下流の窓口の中に稼働率が0.7以上の窓口が3つ [s27 s28 s40] あります。よって窓口s20のサービス率を上げる場合、[s27 s28 s40]のサービス率も増加する必要があります。

???窓口s20への到着量が過大として上流を調べますか?(Y/N): y.
[接続状況] s20の直上流には窓口s15があり、2つの窓口の接続は分岐型です。s15からはs20以外にs18へ分岐出力しています。
[s18の状況] s20に比べ、s18の稼働率はかなり小さいと診断できます。s18の直下流には1個、さらに下流には12個の窓口があります。

直下流の窓口の稼働率は0.5以下なので、s15からs18への分岐確率を増加できる可能性があります。さらに下流の窓口の中に稼働率

が0.7以上の窓口が2つ[s28 s40]あります。窓口s15からの分岐確率を上げる場合、[s28 s40]のサビス率も増加する必要があります。[分岐確率の改善について] s20,s18の関係よりs20の稼働率を減少するために、[s28 s40]のサビス率を増加し、s15からs20への分岐確率を減らし、s18への分岐確率を増加することができます。分岐確率が変われない場合、s15のスループットを減少する必要があります。???s15を診断窓口として上流の窓口を調べますか?(Y/N): y。
 [上流との接続] s15の直上流には、窓口s11とs12があり、s11とs15の接続は分岐型となっています。s11からはs15以外にs14へ分岐しています。
 [到着量の減少について] s12からの到着量の方がs11からの到着量に比べてかなり過大であると診断できます。
 ???s12を診断窓口として上流の窓口を調べますか?(Y/N): y。
 [上流との接続] s12の直上流にはs6とs8の窓口があり、s12との接続は、各々分岐型となっています。
 [到着量の減少について] s6のスループットを改善した方がよいと診断できます。

＜ 省 略 ＞

???s1を診断窓口として上流の窓口を調べますか?(Y/N): y。
 [s1への到着量減少について] s1への到着量はs14への外部入力、上流に窓口はありません。よって、s1への到着量を減少するためには、この外部入力gaの過大さを改善する必要があります。
 ???s15の上流をs11とし、バックトラグ診断を実行しますか?(Y/N): y。
 [接続状況] s15の直上流には窓口s11があり、2つの窓口の接続は分岐型です。s11からはs15以外にs14へ分岐出力しています。
 [s14の状況] s14の稼働率は、s15の稼働率とほぼ等しいと診断できます。s14の直下流には1個、さらに下流には13個の窓口があります。直下流の窓口の稼働率は0.5以下なのでs11からs14への分岐確率を増加できる可能性があります。さらに下流の窓口の中に稼働率が0.7以上の窓口が2つ[s28 s40]あります。窓口s11からの分岐確率を上げる場合、[s28 s40]のサビス率も増加する必要があります。
 [分岐確率の改善について] [s14 s28 s40]のサビス率を増加しs15への分岐確率を減らし、s14への分岐確率を増加することで、s20の稼働率を減少することができます。分岐確率が変われないならs11の上流を調べる必要があります。
 ???s11を診断窓口として上流の窓口を調べますか?(Y/N): y。

＜ 省 略 ＞

診断窓口 : s20 (ボトルネック窓口)
 ボトルネック窓口s20の改善のために変更すべきパラメータ
 *プラン-1 [s27 s28 s40 s20]のサビス率増加
 *プラン-2 [s28 s40]のサビス率増加
 分岐確率(s15,s20)減少、分岐確率(s15,s18)増加
 *プラン-3 [s14 s28 s40]のサビス率増加
 分岐確率(s11,s15)減少、分岐確率(s11,s14)増加
 *プラン-4 [s14 s28 s40]のサビス率増加
 分岐確率(s4,s11)減少、分岐確率(s4,s10)増加
 *プラン-5 外部入力gc減少
 *プラン-6 外部入力ga減少
 *プラン-7 外部入力gb減少

他の窓口について調べますか?(Y/N): n。
 BDESによるボトルネック診断を終了します。

図22(a) BDESによる診断結果①

[ネットワーク名: nq4, 改善開始窓口: s20, 改善回数: 1]
 *****変更すべきパラメータ*****
 サビス率: s20 0.100 → 0.122
 s27 0.100 → 0.112
 s28 0.200 → 0.243
 s36 0.100 → 0.112
 分岐確率: (s34,s40) 0.70 → 0.24
 (s34,s39) 0.30 → 0.76

図22(b) BDESによって算出されたパラメータ①

稼働率が最大となる窓口の窓口名と稼働率を出力します。
 (s12 0.88)
 稼働率が最小となる窓口の窓口名と稼働率を出力します。
 (s13 0.10)
 稼働率が0.7以上の窓口の窓口名と稼働率を出力します。
 (s12 0.88) (s14 0.80)
 診断する窓口名を入力してください。: s12。

＜ 省 略 ＞

診断窓口 : s12 (ボトルネック窓口)

ボトルネック窓口s12の改善のために変更すべきパラメータ
 *プラン-1 s12のサビス率増加
 *プラン-2 s14のサビス率増加
 分岐確率(s6,s12)減少、分岐確率(s6,s11)増加
 *プラン-3 外部入力gb減少
 *プラン-4 s14のサビス率増加
 分岐確率(s1,s5)減少、分岐確率(s1,s3)増加
 *プラン-5 外部入力ga減少

図22(c) BDESによる診断結果②

[ネットワーク名: nq4, 改善開始窓口: s12, 改善回数: 2]
 *****変更すべきパラメータ*****
 サビス率: s12 0.100 → 0.125

 図22(d) BDESによって算出されたパラメータ②

稼働率が最大となる窓口の窓口名と稼働率を出力します。
 (s14 0.80)
 稼働率が最小となる窓口の窓口名と稼働率を出力します。
 (s13 0.10)
 稼働率が0.7以上の窓口の窓口名と稼働率を出力します。
 (s14 0.80)
 診断する窓口名を入力してください。: s14。

＜ 省 略 ＞

診断窓口 : s14 (ボトルネック窓口)

ボトルネック窓口s14の改善のために変更すべきパラメータ
 *プラン-1 s14のサビス率増加
 *プラン-2 分岐確率(s11,s14)減少、分岐確率(s11,s15)増加
 *プラン-3 分岐確率(s10,s14)減少、分岐確率(s10,s13)増加
 *プラン-4 分岐確率(s6,s11)減少、分岐確率(s6,s12)増加
 *プラン-5 外部入力gc減少
 *プラン-6 外部入力ga減少

図22(e) BDESによる診断結果③

[ネットワーク名: nq4, 改善開始窓口: s14, 改善回数: 3]
 *****変更すべきパラメータ*****
 サビス率: s14 0.200 → 0.228

図22(f) BDESによって算出されたパラメータ③

Name	Simulation①		BDES・BIES		Simulation②	
	ρ	q	ρ		ρ	q
S12	0.88	5.01	0.69		0.74	2.97
S14	0.80	3.33	0.69		0.70	1.52
S15	0.63	1.03	0.60		0.59	1.07
S20	0.85	5.31	0.69		0.73	1.87
S27	0.76	2.27	0.69		0.74	2.33
S28	0.83	3.57	0.69		0.73	1.72
S36	0.66	1.50	0.69		0.72	1.87
S40	0.93	12.94	0.69		0.73	1.89

図22(g) 測定と自動チューニングの比較

図22 図4 (NQ4) の診断例