

平均と分散によるシンクライアントサービス用仮想化サーバの性能管理方法

網代 育大^{1,a)} 藤若 雅也¹ 竹村 俊徳¹

概要：サーバの性能管理手法として、これまで主に平均 CPU 使用率を閾値と比較する方法が用いられてきた。しかし、シンクライアントサービスのようなリアルタイム性の高いアプリケーションでは、サーバの過負荷がユーザの体感性能に与える影響が大きいにも関わらず、閾値の基準やそもそも平均値の管理で十分なのかについての議論がなされていなかった。本研究は、仮想シンクライアントシステムの物理マシンと仮想マシンから採取した CPU 使用率の分析結果から、CPU 使用率の分散と過負荷の発生頻度に密接な関係があることを示す。平均値にくわえた分散値の管理は、性能監視の精密化や性能改善手段の多様化に貢献するものと期待される。分散を含めた性能の可視化や、仮想マシン配置への応用について述べる。

1. はじめに

もっとも基本的なサーバの性能管理方法は、CPU 使用率を始めとする各種リソース使用量の採取と分析である。システムの本番環境では、採取に伴う処理オーバーヘッドが業務系の処理に悪影響を与える可能性が懸念されるため、多くの場合、5 分や 15 分といった比較的長い時間間隔のサンプリング値が採取される。採取されたリソース使用量は閾値と比較され、閾値を超えている場合には対策が講じられる。CPU 使用率に対する閾値としては、システムの重要度や諸元、エンジニアの経験則に基づいて、50%から 80%の値が設定されることが多い。

リソース使用量は時間とともに変動するため、たとえば 5 分間の平均値が閾値以下であっても、そのうちのある 5 秒間をみると CPU 使用率が 90%や 100%に達している可能性がある。Web サーバであれば、CPU 使用率が瞬間的に過負荷となったときに運悪く到着したリクエスト群は、その一部が処理されないまま滞留する恐れがあるが、リアルタイム性への要件が比較的緩い場合が多く、それほど大きな問題にはなっていない。このような平均と閾値による性能管理方法は、リソース使用量の分布がポアソン分布のように平均値によって規定され、瞬間的な過負荷の発生率が平均値の調整によって一定以下に抑えられることを前提としたやり方である。

一方、現在では、多くのサーバが仮想化されたサーバ上

の仮想マシン (VM) として稼働するようになっている。仮想化技術の成熟化と CPU コア数の増加によって、仮想化サーバや VM の割合は今後さらに増加していくことが予想される。多数の仮想マシンに分割して利用される仮想化サーバ (物理マシン) に対して、平均リソース使用量と閾値による従来の管理方法は十分なのだろうかという疑問が本研究の動機である。

仮想化サーバのリソース使用量は、その上で動作する VM 群のリソース使用量の合計に、ハイパーバイザの使用量や仮想化オーバーヘッドを加えたものである [2]。統計学の基本定理である中心極限定理によれば、任意の分布から抽出した標本の和や平均は、標本の個数が大きくなるほど正規分布に近づく。正規分布は平均と分散によって規定される分布である。仮想化サーバのリソース使用量が正規分布にしたがうとすれば、前述の瞬間的な過負荷の発生確率を管理するためには、リソース使用量の平均だけでなく、分散にも目を配る必要がある。

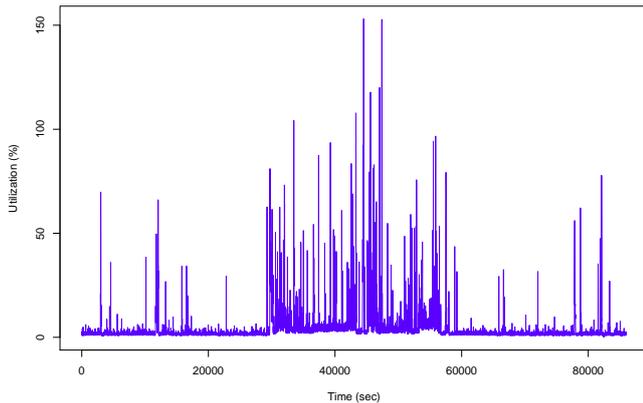
本研究では、仮想マシン型シンクライアントシステムの物理マシンと仮想マシンから CPU 使用率を採取し、負荷の特徴や正規性 (正規分布との適合度) を調査した。この結果に基づき、平均と分散を使って過負荷の発生率を管理する手法を提案する。また、仮想マシン配置への応用についても述べる。

2. 負荷の特徴

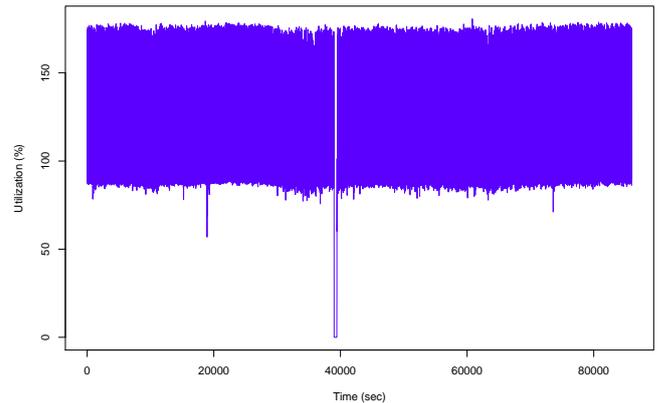
調査対象は、複数のユーザに VM 型のデスクトップ環境を提供する仮想化シンクライアントサーバ 25 台である。ユーザに提供されるアプリケーションは、Windows OS

¹ NEC 情報・ナレッジ研究所
1753, Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kanagawa
211-8666, Japan

a) y-ajiro@cd.jp.nec.com



(a) 典型的な時系列



(b) 例外的な時系列

図 1 VM の CPU 使用率に関する 1 日分の時系列データ．横軸の単位は (秒) で 0 時から 24 時までの 86,400 秒に対応する．縦軸は CPU 使用率 (%) ．

上の Microsoft Office 等である．仮想化サーバの CPU は Xeon Quad-Core 2 way で，サーバあたり計 8 CPU コアを搭載する．仮想化サーバは 1 台あたり 40 VM を収容しており，全体で約 $25 \cdot 40 = 1,000$ VM を提供する．計測データとしては，1 VM に不備があったため，999 VM 分が得られた．仮想化ソフトウェアは VMware ESX 3.0 であり，ESX の提供する `esxtop` コマンドでデータを採取した．採取間隔は 15 秒で，4 週間分のデータを採取した．CPU 使用率以外のデータも一緒に採取しているが，今回は特に CPU 使用率について報告する．

2.1 仮想マシンの負荷の特徴

最初に，VM の CPU 使用率の特徴について述べる．VM の CPU 使用率に関する 1 日分の時系列データを図 1 に示した．図 1(a) と 1(b) は，それぞれ典型的な時系列と例外的な時系列の 1 例である．また図 2 は，平均 CPU 使用率を度数分布の階級にとり，前述の 999 VM を分類した結果である．度数の合計は 999 となっている．分布は 0 から 100% 以上まで広範囲にわたるが，大多数の 972 VM については平均 CPU 使用率が 20% 以下の範囲に収まっている．この 972 VM は（詳細に調べたわけではないが）図 1(a) のような典型的な時系列を有している．残りの 27 VM は，程度の差はあるものの，日や時間帯によって図 1(b) のような高負荷状態が継続するという特徴をもつ．

また，各 VM には 1 CPU コアを割り当てているが，VM の CPU 使用率は 100% 超えることがあり，場合によっては 200% 近くまで上昇する場合がある．これは，`esxtop` が各 VM の CPU 使用率として出力する値に，VM の処理を実行するためのハイパーバイザの処理が加算されているためと推測される．

典型的な時系列は，一般的な勤務時間である 9:00 から 17:00 付近で負荷が少しだけ上昇するというパターンであ

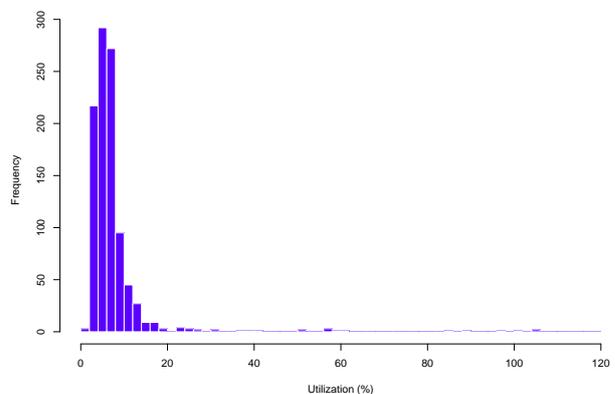


図 2 平均 CPU 使用率を階級とする VM の個数の分布

る．上記の 972 VM に関する勤務時間帯の平均 CPU 使用率は 7.6%，それ以外の時間帯では 5.0% であった．夜間には，ウイルスチェック等のプロセスが起動されている．デスクトップアプリケーションの場合，CPU の負荷はユーザがなんらかの操作をおこなった一瞬だけスパイク状に上昇するという特徴がある．物理マシンの CPU が瞬間的に過負荷となるのは，その上で稼働する VM のスパイクが偶然重なったときと考えられる．そのため，仮想化サーバの CPU リソースは，「CPU 使用率がある閾値を超える確率をある値以下に抑える」ことを目標として確率的に管理するのが合理的である．

2.2 物理マシンの負荷の特徴

次に物理マシンの CPU 使用率の特徴について述べる．物理マシンの CPU 使用率に関する 1 日分の時系列データの 1 例を図 3 に示す．VM の場合と同様，勤務時間帯に負荷が 5 割ほど上昇する傾向がみられる．また，負荷の変動がかなり激しい様子がみとれる．一方，物理マシンの場

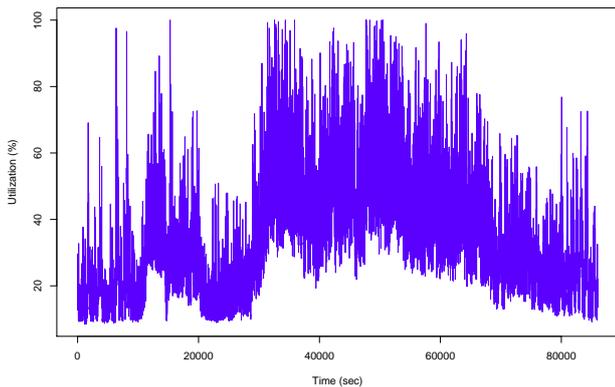


図 3 物理マシンの CPU 使用率に関する 1 日分の時系列データ

合は、マシンごとに平均 CPU 使用率が異なるものの、時系列の変化の仕方に大きな違いはない。図 1(b) のような例外的な高負荷を示す VM は個数が少なく、物理マシンへの影響は限定的といえる。物理マシンは 8 CPU コアを備えており、1 コアを割り当てた仮想マシン 1 台が物理マシンに与える影響は、最大でも $1/8$ (12.5%) から $1/4$ (25%) 程度である。ここでは物理マシンに関して図 4 のような頻度分布の提示は省略するが、第 4 節で関連する分析結果を示す。

3. CPU 使用率の度数分布

前節では、仮想マシンと物理マシンのそれぞれについて、CPU 使用率の時系列に関する特徴を説明した。本節では、時系列データから時間の成分を排除し、15 秒間隔で採取した CPU 使用率の値がどのような度数分布をもつかを分析した結果について説明する。

3.1 仮想マシン

図 4 は、ある VM の CPU 使用率の分布を示したものである。図 4(a) は典型的な VM、図 4(b) は例外的な VM の分布の 1 例を表している。データは平日の 19 日分、9 時から 17 時までのものを使用した。典型的な VM の CPU 使用率の分布はパレート分布のようなロングテール型の特徴を備えている。VM の CPU 使用率は 10% から 20% 以下の場合がほとんどで、20% を超える場合はまれであるが、分布のテールが長いので、20% を超える場合の度数の合計値は、無視できるほど小さな値ではない。なお、図 4(a) では、わかりづらいが、150% 付近にもデータが 1 つだけ存在している。ついでながら、平均 CPU 使用率に対する VM 数の分布 (図 2) も、図 4 とよく似たロングテール型の特徴をもっている。一方、図 4(b) のような例外的な VM の分布は、典型的な分布とは特徴が完全に異なり、VM によっても分布の形状が異なる。図 4(b) は、あくまでそのような多様な分布の 1 例である。

3.2 物理マシン

前述の VM の分布とは対照的に、物理マシンの CPU 使用率の分布は、中心極限定理の通り、正規分布に近い鐘形 (ベルカーブ) の形状である。図 5 に、物理マシンの CPU 使用率に関する度数分布の例を示す。図 5(a) の例は、最頻値を中心とする正規分布に、ロングテール型の分布を加えたような形状をしている。図 5(b) は、おそらく最頻値が大きいため、形状が正規分布に近づいたものである。しかし物理マシン 25 台の大部分を占める 24 台は、図 5(a) のような混合型となっていた。シャピロ-ウィルク検定 (Shapiro-Wilk test) やコルモゴロフ-スミルノフ検定 (Kolmogorov-Smirnov test) といった手法で正規分布との適合度を検定したが、この 24 台については適合しているという証拠はまったく得られなかった。

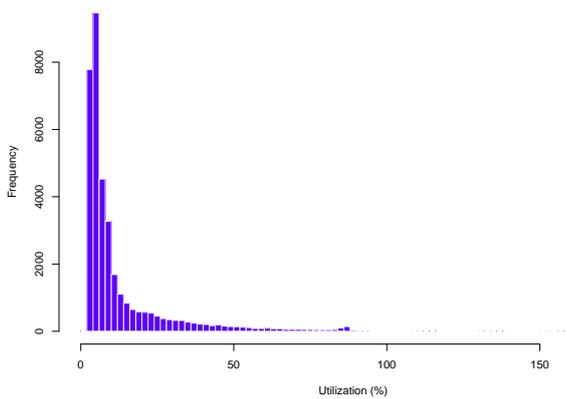
検定は、VM のときと同様、25 台の物理マシンの平日 19 日分、9 時から 17 時までのデータを使って、各サーバと日ごとにおこなった。すなわち、 $25 \cdot 19 = 475$ 個のサンプルに対して、それぞれ前述の 2 種類の検定をおこなった。その結果、シャピロ-ウィルク検定の p 値は、図 5(b) の物理マシンに関する 1 サンプルのみ 0.039 であったが、そのほかの 474 サンプルについては 0.00 であった。つまり 5% 有意水準で考えると、正規分布との適合はすべて棄却される結果となった。

もう 1 つのコルモゴロフ-スミルノフ検定では、シャピロ-ウィルク検定の p 値が 0.039 になったサンプルに対する p 値が 0.736 となり、そのほかにも図 5(b) の物理マシンに関して、p 値が 0.234, 0.100, 0.030, 0.012, 0.043 のサンプルが 1 つずつみつかった。この物理マシン以外では、p 値が 1% を上回るのは 1 サンプルのみであった。

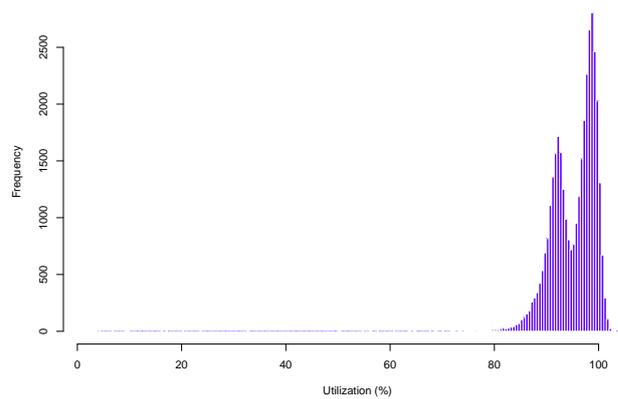
今回正規性に関してよい結果が得られなかった原因は 2 つ考えられる。ひとつは、各 VM の CPU 使用率の分布や平均値が、その多くが類似はしているものの、厳密に同一ではない点である。例外的な CPU 負荷をもつ VM の影響や、多くの VM の CPU 使用率の分布がロングテール型であることも、正規分布への収束が遅い要因と考えられる。もうひとつの原因は、物理マシンに収容されている VM の個数がまだ少ない点であるが、こちらの問題については、今後 CPU 性能の向上に伴って VM の収容数が増えるとともに解消されるものと思われる。

4. 物理 CPU 使用率の平均、分散と過負荷との関係

本節では、これまでの VM や物理マシンの特徴を踏まえ、物理マシンの CPU が過負荷となる頻度や確率について論じる。VM がオーバーコミットされたシステムの場合、物理マシンの過負荷は、その上で動作するすべての VM に影響を与えるため、システム運用上の大きな問題となる。使用するサンプルは、前節と同じく物理マシン 25 台の 19 日

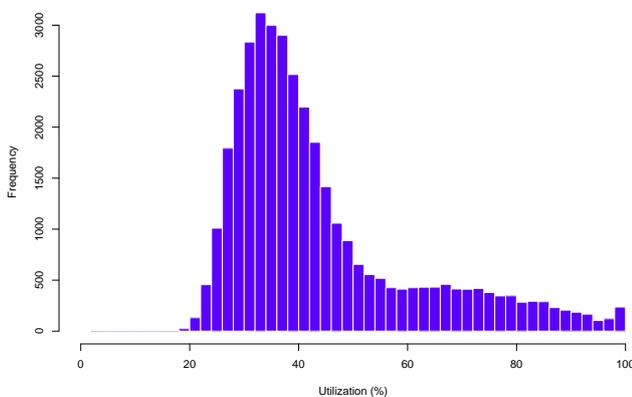


(a) 典型的な VM

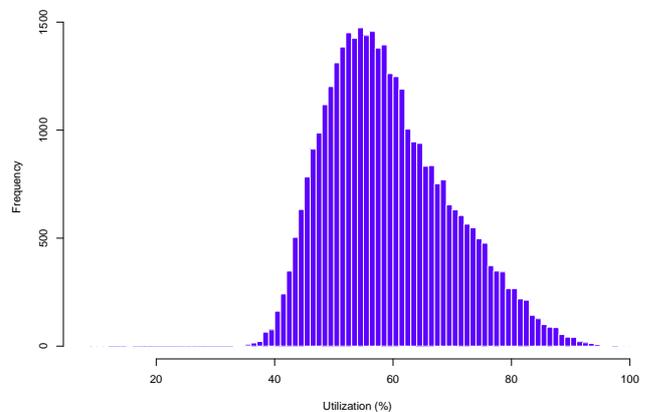


(b) 例外的な VM

図 4 VM の CPU 使用率の度数分布



(a) 正規分布から遠い例 (大多数)



(b) 正規分布に比較的近い例

図 5 物理マシンの CPU 使用率の度数分布

分、計 475 サンプルである．これを使って CPU 使用率の平均値と過負荷の発生率との関係を調べた．調査結果をもとに、CPU 使用率の分散が過負荷の発生率に与える影響について述べる．

4.1 平均物理 CPU 使用率と閾値超過率

図 6 は、上記 475 サンプルに関する平均 CPU 使用率と閾値超過数との関係を散布図としてプロットしたものである．ある 1 日のデータは、9 時から 17 時までの 8 時間のあいだ、15 秒間隔で採取されているため、計 $8 \cdot 3600 / 15 = 1,920$ 個のデータで構成される．実際のデータ数は、esxtop コマンドが 1 時間おきに無効なデータを出力していたため、 $1,920 - 8 = 1,912$ 個である．図 6 の縦軸は、この 1,912 個のデータのうち、CPU 使用率の値が 90% を超えていたデータの個数を表している．今回は過負荷の判定基準（閾値）として 90% を用いた．便宜上、CPU 使用率が閾値の 90% を超えているデータの個数を閾値超過数、これを 1,912 で割った数値を閾値超過率とよぶことにする．たとえば閾

値超過率が 5% のとき、CPU 使用率が 90% を超えている期間は、15 秒未満の CPU 使用率の乱高下がないと仮定すれば、勤務時間 8 時間のうちの約 $8 \cdot 60 \cdot 0.05 = 24$ 分間と算出される．

閾値超過状態のときに実際にユーザの体感品質が大きく低下しているとすると、勤務時間中の 24 分間の品質低下を意味する閾値超過率 5% は、性能管理上の基準値としては大きな値である．しかし、図 6 によると、現在多く使用されている「平均 CPU 使用率が 50% 以下」の基準で達成される閾値超過率は 5% 程度である．仮に閾値超過率を 1%（勤務時間中の閾値超過状態は 4.8 分間）に抑えようと思うと、物理マシンの平均 CPU 使用率（平均物理 CPU 使用率）は 40% 以下にしないといけない．

また、図 6 から、閾値超過数は平均 CPU 使用率が 45% を超えた付近から急上昇することがわかる．これは CPU 使用率の平均値の上昇にともなって分散も増加することが原因である．図 7 は、図 6 と同様の 475 サンプルに対して、CPU 使用率の平均と分散の関係を散布図にプロットした

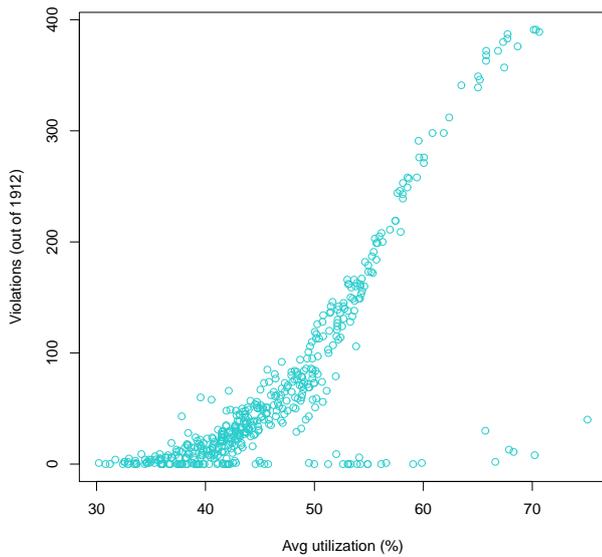


図 6 物理マシンの平均 CPU 使用率と閾値超過数との関係 (散布図)

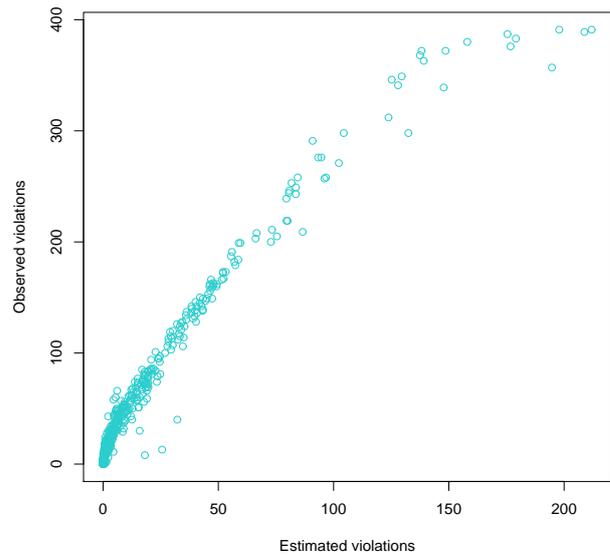


図 8 閾値超過数の推定値と観測値の関係 (散布図)

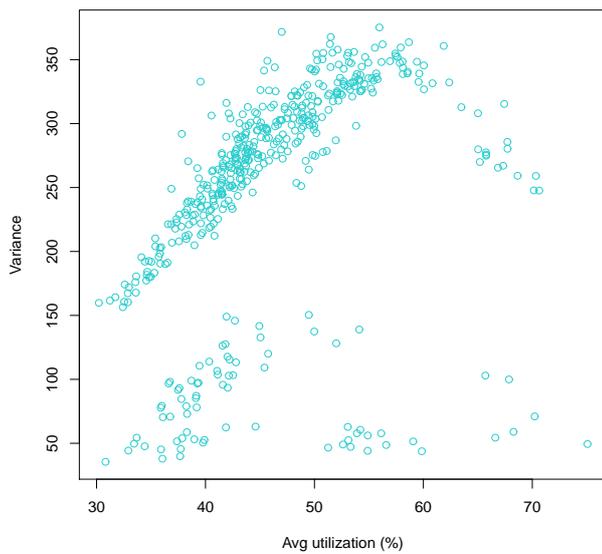


図 7 物理 CPU 使用率の平均と分散の関係 (散布図)

ものである。多くのサンプルについて、平均値の増加とともに分散の増加がみられる。ただし、少数のサンプルについては、平均の増加に伴う分散の増加がみられない。図 6 の閾値超過数のプロットをみると、平均 CPU 使用率が高いにも関わらず閾値超過数が小さいサンプルが存在するが、これはサンプルのもつ分散が小さいことによるものである。CPU 使用率は、たとえば平均が 80% であっても、まったく変動しないのであれば 90% を超えることはない。

分析結果は、今回対象とした VM 型のシンクライアントシステムに対し、平均 CPU 使用率だけでなく分散を考慮することによって CPU の過負荷発生率 (閾値超過率) を

より効率よく管理できる可能性を示すものである。次に、平均と分散と閾値超過率の関係についての分析結果を述べる。

4.2 平均、分散からの閾値超過率の推定

前の第 3 節では、物理マシンの CPU 使用率に関して正規性がほぼ否定される結果を示したが、我々は正規性を仮定することによって推定される閾値の超過数と、実際のデータから算出される超過数にどのような違いがあるかについて調べた。

正規分布は、平均 μ と分散 σ^2 をパラメタとしてもつ確率分布であり、その累積分布関数は次の式で表現される。

$$F(x) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right) \quad (1)$$

式中の関数 erf は誤差関数であり、その定義は次のとおりである。

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

累積分布関数 $F(x)$ は、確率変数の値が x 以下となる確率を表している。閾値超過率の例に即していえば、閾値を x としたとき、閾値超過率 q は次式で算出される。

$$q = 1 - F(x) \quad (2)$$

つまり、CPU 使用率の変動が正規分布と等しいと仮定すると、閾値超過率は上式 2 で計算することができる。これにデータ数をかけたものが閾値超過数である。

各サンプルの平均と分散から式 2 を基に算出した閾値超過数 (閾値 90%) の推定値と、各サンプルの時系列データから直接求めた閾値超過数の実測値との関係を図 8 に示す。

図から明らかのように、推定値と実測値にはきわめて強い相関があることがわかった。相関分析の結果は、相関係数 0.969、閾値超過数の推定値を Q_e 、実測値を Q_o としたとき、 $Q_o = 2.37Q_e + 19.5$ である。また今回のデータでは、過負荷判定の閾値を 95%や 99%にしても、同様に推定値と実測値とに強い相関がみられた。相関分析の結果は、閾値 95%のとき、相関係数 0.988、 $Q_o = 3.45Q_e + 6.70$ 、閾値 99%のときは、相関係数 0.986、 $Q_o = 4.02Q_e + 0.407$ となった。すなわち、物理マシンの CPU 利用率の分布は正規分布とはいえないが、今回調査した範囲においては、正規分布に近い分布であるという結果が得られた。

4.3 可視化と性能改善

最後に、CPU 利用率のデータから平均と分散を算出し、これらと閾値超過率とがどのような関係にあるかを可視化することによって性能を管理する手法を提案する。まず、式 1, 2 を分散に対する平均 CPU 利用率の関数として整理すると、次式が得られる。

$$\sigma^2 = \frac{(x - \mu)^2}{2 (\text{erf}^{-1}(1 - 2q))^2} \quad (3)$$

一方、前の第 4.2 節の結果から、閾値 90%に対する閾値超過数の推定値 Q_e と実測値 Q_o には $Q_o = 2.37Q_e + 19.5$ の関係があることがわかっている。今回の例では、超過数は超過率にデータ数の 1,912 をかけたものなので、超過率の推定値 q_e と実測値 q_o の関係は $q_o = 2.37q_e + 0.0102$ となる。これは、たとえば閾値超過率 0.05 (5%) の実測値が、推定値 $0.05 - 0.0102/2.37 = 0.0168$ に対応することを意味している。推定値 q_e は正規分布から算出される値であり、式 3 の q は q_e と等しい。すなわち、形式的には、閾値超過率の推定値 q と実測値 q_o が

$$q_o = a \cdot q + b \quad (4)$$

の関係にあるとすると、実測値による平均 μ 、分散 σ^2 、閾値超過率 q_o の関係は次のように表される。

$$\sigma^2 = \frac{(x - \mu)^2}{2 (\text{erf}^{-1}(1 - 2(q_o - b)/a))^2} \quad (5)$$

CPU 利用率の平均と分散の関係プロットした図 7 上に、式 3 で $q = 0.05$ とした閾値超過率の推定値 5%の関数と、式 5 で $q_o = 0.05$ とした実測値の関数を重ねたものを図 9 に示す。推定値に基づく右上側の曲線によると、この曲線の上側に存在する閾値超過率 5%以上のサンプルは非常に少ないようにみえる。しかし実際には、CPU 利用率のデータが正規分布とは異なるため、実測値に基づいて補正した左下側の曲線が閾値超過率 5%の関数に対応している。左下側の曲線によれば、閾値超過率 5%のサンプルは相当数存在していることが読みとれる。

次の図 10 は、可視化の例として、同様に閾値超過率 3%と

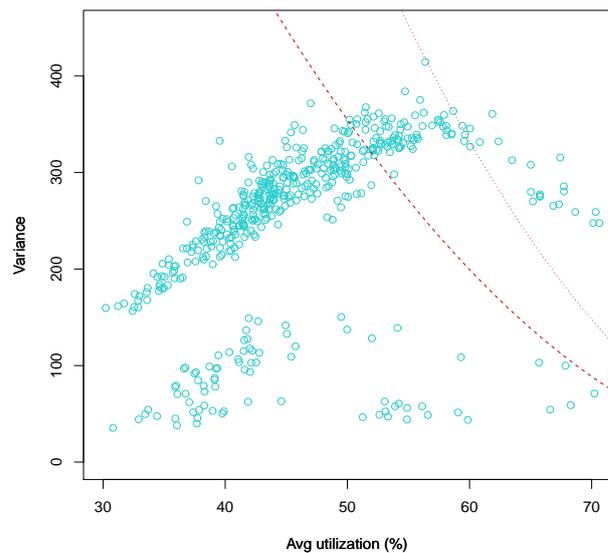


図 9 平均 CPU 利用率と分散の散布図に、閾値超過率 5%の関数を重ねたもの。右上側の曲線が正規分布に基づく推定値による関数、左下側の曲線が実測値による関数に対応する。

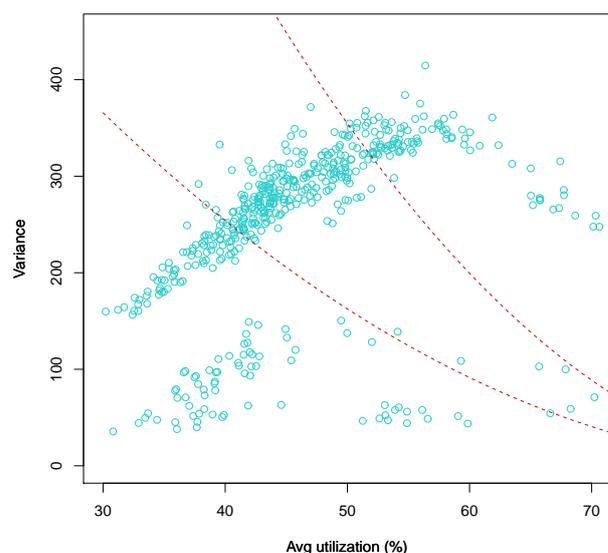


図 10 平均 CPU 利用率と分散の散布図に、閾値超過率 3% (左下側) と 5% (右上側) の実測値による関数を重ねたもの。

5%の実測値による関数を散布図上にプロットしたグラフである。ちなみに、今回のデータや手法では、閾値超過率 1%の関数はプロットが不可能である。なぜなら、閾値超過率の実測値は、 $q_o = 2.37q_e + 0.0102$ で表され、常に 0.0102 以上とみなされるためである。

厳密な SLA に基づいてシステムを運用する場合は、閾値超過がどのくらいの頻度で発生しているかを管理する必要がある。図 10 のように、過去の実績データの上に閾値超過率の関数を重ねることで、対象システムにおける閾値超過

の様子や傾向を直感的に把握することができる。また、閾値超過率を固定したときの分散値は、平均の増加に対して単調減少の関係にある。これは、閾値超過率を一定以下に維持するには、平均 CPU 使用率を抑えるだけでなく、分散を抑える手法が有効であることを示唆している。

確率変数 X の分散を $V(X)$ とすると、分散の基本的な性質として、確率変数 X, Y が独立の場合、確率変数の和に関する関係 $V(X + Y) = V(X) + V(Y)$ が成り立つ。これはつまり、確率変数を VM の CPU 使用率に対応させると、CPU 使用率に関する分散の小さな VM であれば、分散の大きな VM と比べて、多数の VM を物理マシン上に収容できることを意味する。我々のグループは、前述のデータを用いた分析により、分散の小さな VM 同士を組み合わせることで VM の収容率を現状よりも 12.3%改善できる見込みを得ている。今後、このような工夫を含む性能改善手法の開発が必要である。

5. まとめと今後の課題

仮想化シンクライアントシステムから 15 秒という短いインターバルで採取した CPU 使用率のデータを使い、仮想化サーバの CPU 使用率に対する正規性の検定と、過負荷の発生頻度（閾値超過率）の分析をおこなった。中心極限定理から、仮想化サーバの CPU 使用率の分布は正規分布にしたがうことが期待されたが、分析の結果、正規性はほとんど確認できなかった。しかしながら、CPU 使用率の平均と分散から正規性を仮定して算出される閾値超過率の推定値と実際の閾値超過率とは非常に強い正の相関があることがわかった。この結果は、分散が閾値超過率に大きな影響を与えている事実を示しており、従来の平均 CPU 使用率にくわえた分散の管理は、仮想化システムの性能監視手法の精密化や性能改善手段の多様化に貢献するものと期待される。

仮想化システムの性能改善手法としては、分散の小さな VM 同士を組み合わせることによって VM の収容率を向上できる可能性について第 4.3 節で述べた。我々の簡易評価では、収容率を 1 割以上向上できる見込みであるが、仮想化に伴う仮想化オーバーヘッドの影響を考慮できていない。また、今回の分析結果はデスクトップ用のシンクライアントシステムを対象とした事例の 1 つである。最近では、携帯端末からシンクライアントを操作するシステムや、Android のような携帯用の OS を仮想化するソリューションが発表されており、適用範囲の拡大が今後の課題である。

性能管理における分散値の活用については、特許文献 [1] においてサーバの負荷が正規分布にしたがうことを前提としたワークロード (VM) の割当て手法が提案されているが、このような研究や製品は他にあまりみられない。これは、ログの採取にともなう性能上のオーバーヘッドを重くみて、これまで性能ログの採取間隔が 5 分から 15 分程度に

抑えられてきたためと考えられる。しかしながら、CPU 性能の向上やストレージ容量の拡大、またシステムのクラウド化に伴う SLA の厳格化によって、今後、サンプリング間隔が短縮され、ログの詳細度も上がっていくことが予想される。性能管理や運用管理の現場においても、このような大規模化、複雑化するログを扱うための分析手法や環境が整備される時期にきているといえる。

謝辞 社内システムの性能ログを収集するにあたり、情報システムの主管部門である経営システム本部や (株) NEC 情報システムズの担当者にご尽力頂きました。この場を借りて感謝致します。

参考文献

- [1] 加藤猛, 沖津潤, 斉藤達也, 志賀陽子, 林真一: 情報処理システムの運用管理装置. 特許第 4768082 号 (2011).
- [2] P. Padala, X. Zhu, Z. Wang, S. Singhal and K. G. Shin: Performance Evaluation of Virtualization Technologies for Server Consolidation. Technical Report HPL-2007-59, HP Laboratories Palo Alto (2007).