EFFECTIVE WEB SERVICE LOAD BALANCING THROUGH STATISTICAL MONITORING

統計情報を用いた Web サービスの負荷分散

George Porter, and Randy H. Katz

過負荷時の応答を改良するためにコンポーネント間の関連を特定する

Web サービスは eBay や amazon.com のような Web ベースのポータルサイトにおいて、ますます広まってきている。これらは HTTP コンテナや Java ベースのアプリケーションである Beans, セッション管理機構といったミドルウェアによって構成されている。これらのコンポーネントは Web, アプリケーション, データベースといった複数の層にまたがって提供されている。Web サービスがより新しく、精練された機能を提供するようになるにつれ、ミドルウェアによるサービスの実現はより複雑になる。今日の Web サービスは多様な種類のリクエストとミドルウェアからなっている。

Web サービスは要求に応じてコンポーネントを分割・複製することにより、その規模を拡大していく。すなわち、特定の目的に応じたサーバを設置することでシステムを拡張していく。このように拡張できるにもかかわらず、瞬間的なトラフィックは Web システムのミドルウェアのコンポーネントに過剰な負荷を与える。システムが要求に対して十分な応答を出来ない場合、そのシステムの性能は不十分であるといえる。図

1 に示すように、ユーザにとっては応答時間が増加したように見える。実験によると、ユーザは要求を再送するか諦めるかの選択をするまで、約 8 秒間は待てるということが知られている[2]。

流入制御 (admission control) の必要性は明白であるが、有効なシステムを構築するのは難しく、またエラーも発生しやすい。これは、多種のリクエストとミドルウェアが必要であるからである。Web サービスにおいて、異なったリクエストは異なったコンポーネントに対して負荷を与える [1][3]。さらに、ボトルネックに最も関連する要求を最適化することは有効である。この時、

図 1. ボトルネックに係るリクエストの流量を選択的に制限すると、ウェブサービスの平均応答遅延は著しく減少する。

リクエストとその効果の関係が目に見えて分かる必要がある。しかしながら、現在のシステムソフトウェアとモニタツールはこのような視覚的な情報をオ

コンポーネント間の関連を見つけるために、それぞれの時点で収集された大量のデータを調べるより洗練された方法が必要である。

オペレータに対して提供していない。Web サービスが自己適応型となるためには、自己をより詳しく知っている必要がある。内部のコンポーネント間の関連を明らかにし、過負荷時に Web サイトを利用する全てのユーザに不利益を与えることなく負荷を減らすことができるような操作をオペレータに対して提供する必要がある。

多くのリクエストに対して適切に対応することができる自己適応型の Web サービスを設計するために、我々は 4 種類の技術を提案する。多層システムにおいて要求の効果を明らかにするための単純な統計手法、ミドルウェアを監視するためのブラックボックスアプローチ、意思決定を容易にするための統計情報をまとめた可視化ツール、オペレータがそれらの結果に基づいた流入制御を決定するための方法である。また、一連の手順に人手が介在しているため、厳密には自己適応型のシステムとは言えないこと付け加えておく。我々はこれらのメカニズムを実現するために RUBiS オークションサイト (rubis.objectweb.org) を提供している。RUBiS は eBay のようなオークションサイトの性能を測定するために設計された Web サービスのベンチマークである。提案手法を適用した結果、従来手法と比較して毎秒 70% 以上多くのリクエストに応答することが可能である。加えて、ユーザに対するレイテンシを最大 78% 改善できる。これらの結果より、ミドルウェアを用いた Web サービスは自己適応型のデザインの恩恵を受けることが分かる。

関連研究

我々は RUBiS を用いた Java ベースのミドルウェアの性能を研究している。以前、我々

はワークロードがシステムのボトルネックを決定するための重要な要素であることを示した[1][3]。

我々の手法はオペレーティングシステムと 3 層システムに制御の範囲が及ぶという点で従来手法と異なる。ただし、システムへの要求は均一であると仮定している。SWIFT システム[6][7]は、オペレーティングシステムに対して I/O インターフェースを提供する。これは、ミドルウェア間のインターフェースとも相性がよい。ControlWare システム[10]は、3 層システムにおいて QoS 要件を自動的に対応させるためのツールキットである。

Web サービスの関連の解析のための研究は数多くの文献で発表されており、実際の製品にも利用されている。

図 2. Web 層、アプリケーション層、データベース層からなる複雑な Web サービス

HP 研究所で行われた SLIC プロジェクト[4]では、細粒度のモニタリングとデータ取得により Service-Level Operations (SLOs) の違反を引き起こすコンポーネントを特定できる。IBM の Performance Management プロジェクト[8][5]では、制御理論と取得した情報の統計処理を組み合わせることにより、予想しないトラフィックの増加を検知し、適切な状態に順応させることができる。構造化されたデータを可視化する技術としては[9]がある。

自己適応型の Web サービスにおける過負荷状態の回避

Web サービスに寄せられるリクエスト数が応答可能な許容値を超えた時、過負荷状態となる。トラフィックの急激な変動はシステム更新に比べて短い周期で発生する。オペレータは負荷を管理する多くの手段を持っている。そのひとつに負荷を複数のサーバに分散

させる負荷分散と呼ばれる手法がある。ただし、複雑な Web システムは図 2 のように複数のコンピュータを接続した複数レイヤ構造をしているため、このような環境下において負荷分散を適用することは自明なことではない。というのは、内部コンポーネントの詳細なデータを取得し、それぞれに対して最適化を行うことは難しいからである。

「HTTP 503 TOO BUSY」といった応答により、一時的に負荷を軽減させることもできる。しかしながら、これは少数の要求がボトルネックとなっていた場合であったとしても、Web サイト全体に影響を与えてしまう。RUBiS を用いたシミュレーション結果では、たかだか 15% のリクエストがボトルネックを引き起こし、システム全体に影響を与える。このような問題を解決するために、適切な流入制御を検討しなければならない。

選択的流入制御では、

過負荷を引き起こす要因となるリクエストに対して制御を行う。我々の評価結果によると、データベースの CPU 負荷と応答に必要なアイテムを探す 2 種類のリクエストがボトルネックとなることが分かった。一般的に、分散システムにおいて各コンポ

ーネント間の実行時の関係を決定することは非常に難しい。これらはワークロードによって決定し、また時間経過によっても変化するためである。通信の不明瞭さに加えて、リクエストからボトルネックへの対応付けは自明ではない。このような問題に対し、我々は測定したデータを利用し、リクエストとボトルネックの関連を求める。

問題設定：システムのボトルネックとなるコンポーネント C が与えられ、 C に関連する

リクエストを特定する。使用するデータは最小限に抑えるべきである。関連する要求を特定後、システムが過負荷状態にならない範囲まで C に関連するリクエストの数を減少させる。

以降、我々が提案する手法の詳細について述べる。

ボトルネックに関連する要求の除去

リクエストが Web サーバに到達すると、アプリケーション層において 1 つあるいは複数の

の Java コンポーネントによる処理が呼ばれる。データベースへのアクセス処理や直接結果を返す処理がこれにあたる。各サーバ上でログや状態を取得することが可能であったとしても、システム全体を一度に把握するための良いシステムツールは存在しない。我々は、リクエストとその応答間の相関関係を明らかにするために、取得した大量

リクエストタイプ	P値	相関係数
BrowseCategories.php	0.1747	-0.035
BrowseRegions.php	0.0926	-0.0434
SearchItemsByCategory.php	0	0.5654
SearchItemsByRegion.php	0.0034	0.0756
AboutMe.php	0.7702	0.0075
RegisterUser.php	0.4876	-0.0179
SellItemForm.php	0.4891	0.0179
RegisterItem.php	0.8767	0.004
ViewItem.php	0.0953	-0.0431
PutComment.php	0.5157	-0.0168
ViewUserInfo.php	0.4646	-0.0189
PutBidAuth.php	0.8641	-0.0044
PutBid.php	0.2566	-0.0293
BuyNowAuth.php	0.971	-0.0009
BuyNow.php	0.1206	0.0401
ViewBidHistory.php	0.9741	-0.0008

表 1. ピアソン積率相関係数で発見されたリクエストのボトルネックに対する影響。太字のエントリは統計的に重要で正の相関を持っている。これらは選択的流入制限の対象となる候補である。

のデータを解析するための方法を考えなければならない。

どのリクエストがボトルネックになっているかを知るために、sysstat ツールによって取得する CPU 負荷情報や apache が収集するログを使用する。我々は、リクエストの種類と CPU 負荷の関係を見るためにピアソン積率相関関数を使用する。ピアソン積率相関関数は計算が容易であり、実際の場面において比較的良い結果を得ることができている。我々は以下のような手法でログの統計処理を行う。

1. apache のログをある時間間隔 T_{int} に分割する。今回は T_{int} を 1 秒とした。
2. 各時間間隔に寄せられたリクエストの回数をその種別に応じて数える。
3. n を時間間隔数、 m を種別に応じたリクエストの回数とし、 $n \times m$ の行列 M を定義する。行列要素 $M(i,j)$ はある時刻 i にタイプ j のリクエストが発生した回数を表す。

データベースの負荷を観測することにより CPU 負荷ベクトルを作成する。作成した行列 **M** の列要素と CPU 負荷ベクトルより相関関係を見つける。これはディスク I/O などのボトルネックを探す際に頻繁に利用される手法と同じである。結果を表 1 に示す。ここで、特に重要となるリクエストを太字で強調してある。この太字で強調されているリクエストは流入制御の対象となる候補である。我々は、多くのリクエストと CPU 負荷に関連があると予測していた。例えば、BrowseCategories.php など制御の対象になると考えていた。しかしながら、実際には僅か 2 つのリクエストのみが対象となった。とはいえ、要求の種類は少ないもののこれらのリクエストはデータベース負荷の大部分を占める。巨大なシステムにおける問題のひとつに、関連の低い相関関係をどのように取り除くかという事が挙げられる。数多くのシステム評価指標が与えられると、多くのシステムのコンポーネントやリクエストの種類に関連すると考えられる。学習モデルを用いてこれを管理することも可能であるが、これは本記事の範囲を超える。

ブラックボックス化したコンポーネントの監視

自己適応型のシステムはそのアルゴリズムを利用するためにモニタ情報を必要とする。この時、モニタより取得する情報はできる限り少ない方が好ましい。ブラックボックス化する理由として、少なくとも以下に示す 3 点が挙げられる。

運営しているサービスの中断に対する懸念

我々のシステムを巨大な Web システムに適用することについて議論した所、システムオペレータは「私たちは実験室のプロジェクトではなく、できる限り長い期間の動作を保証した実際のアプリケーションに興味があります。したがって、実際に実現可能なサービスかどうかには注意すべきです」と答えた。そのため、我々は簡単にアクセス可能で日常的に取得可能なデータを用いた統計分析を行う。具体的には、apache によって生成されるログや sysstat によって取得可能なデータを

使用する。ファイルシステムとシステムコールのインターフェースのようなオペレーティングシステム特有のコンポーネントに対する作業の多くはシステムにより異なった作業を必要とする。つまり、専門知識が必要となる。ソフトウェアやハードウェアの更新は頻繁に発生し、低レベルでコードを記述する場合、コンポーネントの変更や更新のたびにこれらの書き換えが必要となる。これは非常に煩雑である。

急速に変化するサービス

今日の Web サービスは急速に変化している。Web サイトの機能は到着するパケットパターンと同様に变化する。大規模な Web サイトではハードウェアとソフトウェアの更新が定期的に行われるので、システムの更新のたびにオペレータは流入モニタシステムや計装システムを再構成しなければならない。これはオペレータにとって非常に手間がかかる。我々は各コンポーネントをブラックボックスとして扱うことにより、ファイルシステムや OS のシステムコール、その他のフック関数など個々のコンポーネントについては変更を必要としない。これにより、高い可搬性を持たせることができ、システムの更新による影響を少なくすることができる。

コンポーネントの所有権の分散

サービスの種類によっては、サイトの管理は数人のオペレータによって行われるかもしれない。このように複数人での監視操作の調整は難しい。高レベルでの測定に焦点を当てることにより、異なったグループではソフトウェアの更新とシステム変更を調整する必要がない。さらに、オープンソースでないコンポーネントに対しての測定は不可能かもしれない。

高レベルでの測定は相関関係を特定するために有効であり、実行システムの性能を大いに改善することが期待できる。

自動的に過負荷状態を緩和するための可視化ツール

以下では、一連の作業中にオペレータが介在する自己適応型の Web サービスシステムを考える。コンポーネントと負荷の基本的な関係を明瞭に可視化することによって、オペレータが的確に意思決定できる。図 3 に我々が提案する可視化の例を示す。ここで円グラフはボトルネックとなるトラフィックの割合を示している。ボトルネックに関連するトラフィックについては、そのリクエストの種類を列挙している。この簡単なグラフによりオペレータは選択する流入制御によって総トラフィック量の何パーセントにどの程度の影響が出るかを判断することができる。

前節で述べた 3 つの問題点とその解決のために、可視化が必要となる。これにより、オペレータに対して問題の原因追求のために必要な情報や性能情報を提供し、過負荷状態となる可能性を減少させる。まず、オペレータがツールにより適切な状態にあると判断すると、この状態の処理を自動化することができる。第 2 に、急速なサービスの変更に対応するために、オペレータに知らされているビジネスルールに従って流量制限を実施するかどうか可視化ツールにより決めることができる。一方で、ツールが頻繁に使用されるような場合、その都度オペレータが関与することなく自動的に動作するようなプログラムが作成されているかもしれない。最後に、コンポーネントの所有権の分散についてである。可視化要求をシステム内で許可することにより、異なった管轄（例えば、企業の異なる部門など）の測定結果を 1

つの情報に関連付けてシステムオペレータに与えることができる。

流入制御に効果的な装置

図 3. 可視化ツールが選択的流入制限の候補と認識されたリクエストを示している。グラフの数字は総リクエスト数における比率である。

レベルで方法、ネットワークレベルでバンド幅に制限を加える方法により実現することができる。我々は、Web 層の変更を必要としないネットワークレベルでの流入制御を用いる。負荷と関連のあるリクエストをバンド幅制限のあるネットワーク経路上に送信する。これにより、エンドユーザへの応答は、制御前と比べて長くなる。すなわち、複数のリクエストで構成されるセッションに要する時間が流入制御実行前と比較して長くなるかもしれないことを意味する。

可視化ツールと実際の流入制御の動作を結びつけるために、統計的情報の解析結果より発見されたボトルネックを解消するためのインターフェースを考える。この表示方法として、我々が述べたグラフと似たものを考える。図 3 の棒グラフによって負荷に関連するリクエスト

を特定することができるだろう。このような特定を行った後、流入制御のためのフィルタを Web サーバ (HTTP ベースで流入制御を行う場合) やネットワーク機器 (ネットワークレベルで流入制御を行う場合) に送信する。

シナリオ	総リクエスト数	負荷と関連のある URL 数	リクエスト数/秒	平均セッション時間 (秒)	最大リクエスト時間 (秒)
標準設定	756,137	112,521 (14.9%)	462	670 秒	154.7 秒
選択的流量制限あり	1,143,264	105,964 (9.3%)	782	872 秒	32.7 秒

表 2. 標準設定と選択的流量制限を施した設定の性能比較。3,500 クライアントからの 30 分間の同時アクセスで計測している。セッションはアクションの一連の操作を表す。

自己適応型のシステムは統計的アルゴリズムを適用するために モニタ情報を必要とするが、このモニタ情報の取得がシステムに 与える影響は最小限に抑えるべきである。

いずれの場合においても、オペレータはボトルネックと到着するパケットのトラフィックの両者に対して、その効果を確認するための手段を持っているはずである。

評価結果

我々は、本記事で述べた 4 つの方法について RUBiS オークションサイトの Web サービスに適用し、評価を行った。評価環境として、IBM BladeCenter と 2 つの Nortel Layer 2-7 ギガビットスイッチから成るシステムを構築した。Nortel のスイッチはギガビットレートで HTTP のリクエストタイプ (URL パターンマッチングに基づいて判断する) を特定し、流入制御の対象となるパケットへ VLAN タグを割り当てることができる。これにより、より詳細な流入制御を行うことが可能となる。バンド幅を削減するために、Linux Traffic Control (tc) 拡張を使用し、対象となるパケットのビットレートを基本レートである 3. 5Mbps から 1Mbps に下げる。

図 1 と表 2 が示すように、選択的流入制御を実行することによりボトルネックとなるリクエストとは関係のないユーザにとっての性能が大幅に向上する。我々の評価では、1 秒間に処理するリクエストの数が 462 回から 782 回に増加した。これは、ボトルネックとなる非常に負荷の大きい処理の回数が減少するためである。したがって、いくつかの連続した要素を探索するためにかかる時間は長くなる。これは、平均セッション時間が 670 秒から 872 秒に増加したことからも分かる。毎秒のリクエスト処理数の増加と最大の応答時間の短縮という正の効果からも分かるように、特定パケットのビットレートを下げることにより Web サイトの訪問者に対して多大な恩恵をもたらす。

まとめ

我々は「多層システムにおいて要求の効果を明らかにするための単純な統計的手法」「ブラックボックス化したコンポーネントの監視手法」「統計的手法の結果をまとめるための可視化ツール」「流入制御を決定するための効果的な方法」といった 4 種の技術から成る自己適応型の Web サービスの構築手法を提案した。我々はオークションシステムを提供する Web サービスにこれらの技術を組み込み、予備評価を行った。その結果、1 秒間に処理可能なページ数が 70%増加し、ユーザが Web サイトにアクセスした際の最大の遅延を 78%削減する事ができた。これらの結果より、自己適応型の Web サービスの構築・展開がますます広まるものと期待される。

文献

1. Amza, C., Cecchet, E., Chanda, A., et al. Specification and implementation of dynamic Web site benchmarks. In *Proceedings of IEEE 5th Annual Workshop on Workload Characterization (WWC-5)*, (Austin, TX, Nov. 2002).
2. Bhatti, N., Bouch, A., and Kuchinsky, A. Integrating user-perceived quality into Web server design. In *Proceedings of the 9th International World Wide Web Conference (WWW9)*, (Amsterdam, The Netherlands, May 2000).
3. Cecchet, E., Chanda, A., Elnikety, S., et al. Performance comparison of middleware architectures for generating dynamic Web content. In *Proceedings of the 4th ACM/IFIP/USENIX International Middleware Conference*, (Rio de Janeiro, Brazil, June 2003).
4. Cohen, I., Chase, J.S., Goldszmidt, M., et al. Correlating instrumentation data to system states: A building block for

- automated diagnosis and control. In *Proceedings of the 6th Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '04)*, (San Francisco, CA, Dec. 2004).
5. Diao, Y., Lui, X., Froehlich, S., et al. On-line response time optimization of an Apache Web server. In *Proceedings of the 11th International Workshop on Quality of Service (IWQoS '03)*, (Monterey, CA, June 2003).
  6. Goel, A., Steere, D., Pu, C., et al. Adaptive resource management via modular feedback control, 1999.
  7. Goel, A., Steere, D., Pu, C., et al. Swift: A feedback control and dynamic reconfiguration toolkit. Technical Report CSE-98-009, Oregon Graduate Institute, Portland, OR, June 1998.
  8. Lassetre, E., Coleman, D.W., Diao, Y., et al. Dynamic surge protection: An approach to handling unexpected workload surges with resource actions that have lead times. In *Proceedings of the 14th IFIP/IEEE International Workshop on Distributed Systems: Operations and Management (DSOM 2003)*, (Heidelberg, Germany, Oct 2003). LNCS, Vol. 2867, Springer, 82-92.
  9. Tufte, E. *Envisioning Information*. Graphics Press, 1990.
  10. Zhang, R., Lu, C., Abdelzaher, T., and Stankovic, J. Controlware: A middleware architecture for feedback control of software performance. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2002)*, (Vienna, Austria, July 2002).
-
- George Porter** (gporter@cs.berkeley.edu) は、カリフォルニア大学バークレー校のコンピュータサイエンス分野の博士課程の学生である。
- Randy H. Katz** (randy@cs.berkeley.edu) は 1983 年よりカリフォルニア大学バークレー校のコンピュータサイエンス分野の教員であり、現在は United Microelectronics 社の教授も兼任している。
-
- 訳：木村英明（筑波大学・システム情報工学研究科）