

Failure Prediction in Complex Computer Systems: A Probabilistic Approach

Günther A. Hoffmann

Abstract

The complexity of current computing systems is a threat to the very benefits these systems aim to provide. Software-related failures are common and some important nonfunctional properties such as availability and responsiveness of these systems are in parts unpredictable. Nonetheless human lives and organizations with considerable economic impact are increasingly dependent on these infrastructures. One way of approaching this problem is to aim at developing perfect flawless software but as long as this ideal is not put into practice another way is for software to anticipate the likely evolution of its dynamics and act preventively to minimize failures and to provide reliable services. Data-driven, nonlinear machine learning techniques promise to capture more of the underlying dynamics of these potentially high-dimensional and noisy systems than traditional methods do, while at the same time making fewer restrictive assumptions about them. For this type of empiric modeling technique to be successful, issues in variable selection, data gathering and preprocessing, parameter optimization and model confidence must be addressed. In this thesis we propose a) a novel data-driven probabilistic modeling technique to capture particular dynamics of a software system or its components which we call Universal Basis Functions, and b) we propose a novel variable selection technique based on a probabilistic wrapper approach. These techniques include efficient methods for parameter estimation and a heuristic for setting initial parameter values. We extend the classic Radial Basis Functions approach, which has been successfully applied to modeling strongly nonlinear domains, by introducing parameterizable mixture kernels instead of Gaussian ones. This allows for more effective coverage of specifics of the solution space. For effective variable selection we propose a wrapper approach which draws variables as a function of a Weibull distribution over ranked variables. Novel applications in modeling and predicting interval call availability and failures at the system level are described for an industrial telecommunication system. At the component level we present an application to a priori resource estimation of a software component. Novel applications of our modeling technique in sensitivity analysis and system fine tuning are presented. Our results clearly indicate superior capabilities of the proposed modeling framework in a) failure prediction, b) resource forecasting and c) feature detection compared to other up-to-date approaches. Our approach thus is an important contribution to a) probabilistic scheduling and b) preventive maintenance of large complex computer systems.

Fehlervorhersage in komplexen Computersystemen: Ein probabilistischer Ansatz

Günther A. Hoffmann

Zusammenfassung

Die Leistungsfähigkeit von Rechnersystemen hat sich in den letzten Dekaden um Größenordnungen erhöht. Gleichzeitig hat sich die Komplexität dieser Rechnersysteme signifikant erhöht. Softwaresysteme zum Beispiel, sind in Ihrer Komplexität so weit gewachsen, dass ihr Verhalten teilweise nicht mehr präzise vorhergesagt werden kann. Softwareinduzierte Ausfälle sind allgegenwärtig und nicht-funktionale Eigenschaften, wie Verfügbarkeit und Responsivität, dieser Systeme sind teilweise nicht prognostizierbar. Die Komplexität aktueller Rechnersysteme droht die Vorteile, die durch die verbesserte Leistungsfähigkeit dieser Systeme erzielt werden, zu nivellieren. Gleichzeitig hängen jedoch Menschenleben und ökonomische Prozesse in signifikantem Ausmaß von diesen Rechnersystemen ab.

Eine wichtige Fehlerquelle in komplexen Rechnersystemen stellt der Softwareanteil dar. Um die Verfügbarkeit von Softwaresystemen zu erhöhen wurden bereits mehrere Strategien entwickelt. Zum einen wird versucht, die Anzahl der Fehler in einer Softwarekomponente während des Entwicklungsprozesses zu verringern. Dies impliziert, dass Umstände, die einmal zu einem Fehler führten, immer zu diesem Fehler führen. Tatsächlich können Fehler jedoch auch erst durch die Ausführung sukzessiver Eingaben in das System ausgelöst werden. Durch Systemtests können solche Eingabemuster teilweise entdeckt werden. Testen kann jedoch nur das Vorhandensein von Fehlern bestätigen, nicht jedoch deren Abwesenheit. Für große und komplexe Systeme können meist nicht alle möglichen Eingaben in das System vorhergesehen und somit getestet werden. Es ist dann unbekannt, welche der nicht getesteten Eingabemuster zu einem Ausfall führen würden. Eine weitere Testmöglichkeit besteht darin, das System einer Fehlerinjektion (*fault injection*) zu unterziehen. Dieser Ansatz leidet jedoch darunter, dass Testszenarios überwiegend händisch definiert werden müssen. Für große Systeme wächst die Komplexität zudem prohibitiv. Zudem ist dieses Verfahren stark produktabhängig. Andere Verfahren wie zum Beispiel Temporale Logik und Prozessalgebra leiden ebenso unter prohibitiv wachsender Komplexität bei großen Systemen. Diese Voraussetzungen führten zu einem veränderten Verständnis von Softwaresystemen, weg von der binären Auffassung *arbeitet das System* hin zu *wie gut arbeitet das System*.

Eine realistische Annahme ist, dass Softwaresysteme oder deren Komponenten letztendlich fehlerbehaftet sind und Ausfälle erzeugen werden. Dies ist der operationelle Rahmen dieser Arbeit. Ein häufig angewendetes Verfahren in diesem Rahmen besteht darin, das System nach einem

Ausfall möglichst schnell wieder neu zu starten. Dieses Verfahren kann jedoch trotz Cluster- und Failover Mechanismen zu erheblichen Dienstunterbrechungen führen. Daher wurde das Verfahren verfeinert, so dass lediglich betroffene Subsysteme neu gestartet werden. Dieses Konzept wird überwiegend reaktiv, also post mortem eingesetzt. Analog zu real existierenden biologischen Systemen, gehen wir davon aus, dass der proaktive - präventive Einsatz zu einer erheblichen Verbesserung der Verfügbarkeit komplexer Rechnersysteme führen kann.

Um den präventiven Einsatz zu gewährleisten werden Verfahren benötigt, die die Entwicklung relevanter Systemparameter, wie zum Beispiel Verfügbarkeit und Responsivität, antizipieren können. Basierend auf dieser Vorhersage, kann das System dann Maßnahmen ergreifen um einen bevorstehenden Fehler entweder ganz zu vermeiden oder seine Auswirkungen zu minimieren. Dieser Ansatz wird in den Forschungsbereichen *self*-* Systeme sowie autonome Rechnersysteme reflektiert. Die grundlegenden Schritte lassen sich wie folgt beschreiben: a) beobachte das Systemverhalten, b) entwickle ein Modell, welches zukünftige Systemzustände als Funktion historischer Beobachtungen prognostiziert, c) initiiere Fehlervermeidungsstrategien basierend auf Fehlerprognosen. In dieser Arbeit werden die beiden ersten Schritte untersucht und ein Lösungsverfahren entwickelt.

Um dieses Modellierungsziel zu erreichen, werden in dieser Arbeit nichtlineare datenbasierte Lerntechniken untersucht und erweitert. Datenbasierte Lerntechniken bieten das Potential, hochdimensionale und verrauschte Systeme besser als traditionelle Methoden modellieren zu können, bei weniger restriktiven Annahmen. Diese Klasse von Modellierungstechniken wurde in der Vergangenheit bereits erfolgreich zur Modellierung dynamischer Systeme sowie von Finanz-, physiologischen und Genomdaten sowie zur Modellierung und Vorhersage von Fehlern in Industrieanlagen eingesetzt. Damit diese empirische Modellierungstechnik erfolgreich eingesetzt werden kann, werden Fragen in den Bereichen Variablenselektion, Datenbeschaffung und -vorverarbeitung, Parameteroptimierung und Modellkonfidenz adressiert.

In dieser Arbeit stellen wir erstens ein neues datenbasiertes probabilistisches Verfahren zur Modellierung beobachtbarer Eigenschaften von Softwaresystemen vor. Wir nennen dieses Verfahren Universal Basis Functions (UBF). Wir erweitern hierzu den Modellierungsansatz Radiale Basis Funktionen, der bereits erfolgreich zur Modellierung stark nichtlinearer, verrauschter Systeme eingesetzt wurde, um parametrisierbare Mischkerne. Dies hat den Vorteil der effizienteren Abdeckung des Lösungsraumes und verbesserter Modellgüte. Zweitens stellen wir ein neues wahrscheinlichkeitsbasiertes Verfahren zur Variablenselektion vor. Dieser Ansatz integriert bekannte Wrapper und Filter Ansätze und erweitert diese um das probabilistische Auswählen von Variablen, die einen besonders hohen Beitrag zur Erhöhung der Modellgüte leisten. Wir nennen diesen Ansatz Probabilistic Wrapper Approach (PWA).

Die entwickelten Verfahren werden erstens auf der Systemebene zur Modellierung und Vorhersage der Intervall-Verfügbarkeit eines industriellen Telekommunikationssystems eingesetzt.

Zweitens, stellen wir auf der Komponentenebene eine Anwendung zur Vorhersage der Nutzung von Systemressourcen vor. Im Vergleich zu linearen als auch nichtlinearen Alternativstrategien können wir die Prognosegüte durch den Einsatz der von uns vorgeschlagenen Modellierungsmethode signifikant erhöhen. Durch den Einsatz der neu entwickelten Variablenselektionstechnik können Selektionsergebnisse gegenüber traditionellen Methoden, inklusive der manuellen Auswahl durch Experten, signifikant verbessert werden. Im Vergleich zu anderen aktuellen Ansätzen, zeigen Modelle basierend auf den hier vorgeschlagenen Verfahren eine deutlich bessere Prognosegüte für Systemfehler, Ressourcenbedarf und Variablenselektion.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Neuerungen lassen sich in drei Gebiete einteilen: a) es wurde eine neue Methode zur Modellierung nichtfunktionaler Eigenschaften komplexer Computersysteme entwickelt, die insbesondere bei hochdimensionalen verrauschten Daten eingesetzt werden kann, b) es wurde eine neue Methode zur Variablenselektion in hochdimensionalen Räumen entwickelt, die eine kombinatorische Explosion umgeht, c) beide Methoden wurden integriert und in neuen Applikationsbereichen auf System- als auch auf Komponentenebene erfolgreich eingesetzt.

In dieser Arbeit wurde ein neuartiges und mächtiges Verfahren entwickelt um auf empirischer Basis das Verhalten komplexer Computersysteme zu modellieren und zu prognostizieren. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass datenbasierte probabilistische Modellierungsverfahren effektiv und effizient zur Modellierung komplexer Computersysteme eingesetzt werden können. Der entwickelte Modellierungsansatz, UBF und PWA, begründet einen neuartigen und vielversprechenden Schritt hin zu sich selbst verwaltenden Systemen (*self-* systems*) in einem Umfeld stetig steigender Systemkomplexität. Die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren können insbesondere eine wichtige Grundlage darstellen a) zum verbesserten probabilistischen Scheduling und b) zur präventiven Instandhaltung (*preventive maintenance*) komplexer Computersysteme.