

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25540006

研究課題名(和文)システム安全性検証のための逆方向シミュレーション

研究課題名(英文)Backward Simulation for Evaluating System Safety

研究代表者

平中 幸雄(HIRANAKA, YUKIO)

山形大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40134465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：システムの安全性を評価する方法として、逆方向シミュレーションを研究している。異常結果を起点に、それを引き起こす可能性のある入力範囲が存在すれば、安全でないと判定する。しかし、逆方向モデルの作成は一般に困難であるので、数値的な逆方向モデルを使って、場合分け処理によりシミュレーションの実現を試みた。具体的に、電気料金のダイナミックプライシング、暖房による室温変化、一般的なインパルス応答の逆算に適用し、有効であることを示した。また、逆算の分岐数と計算量、計算精度に関する評価も行った。

研究成果の概要(英文)：We are studying backward simulation as a tool to evaluate safety of a system. If the backward simulator results in a feasible input range for an abnormal starting output data, it means that the system may not be safe. However, backward simulation models are hard to build in many cases. In this research, we tried a numerical backward calculation model and a case branching simulation method. Simulation results show the effectiveness of our backward simulation for the cases of dynamic pricing of the electricity charges, inference of heater activity from measured room temperature change, and deconvolution of impulse responses. Also, we acquired a knowledge about the relation among branch resolution in backward simulation, processing time and resultant precision.

研究分野：情報ネットワークとシステムの安全性

キーワード：逆方向シミュレーション システム安全性検証 範囲信号 数値逆方向モデル ケース分岐シミュレーション
ダイナミックプライシング FIR逆フィルタ

1. 研究開始当初の背景

技術の進歩により、さまざまなものが自動化され、システムとして機能するようになってきているが、欠陥や想定外の入力により、障害を起こし、その結果、甚大な被害が発生するケースが増えている。そのような障害が発生する可能性をシステムテストで完全に見つけ出すことは、テストケース数が組み合わせ爆発を起こすことから、通常、困難である。実験計画法等により、少ないテストケースで効率よく障害要因を見つけることが行われるが、システムの安全確保のためには、網羅的な検証方法を開発する必要がある。

2. 研究の目的

システムの安全性を逆方向シミュレーションによって分析・評価する方法を考案した。通常の順方向シミュレーションでは、可能性があっても条件設定が少し違えば、異常出力に行き当たらないかもしれない。逆に、異常出力から逆算していき、異常の可能性あるかを調べていくと効率的に判断ができることが多い。

ただし、システム構成要素の逆方向モデルでは、逆算が一意に行えず、適用が困難な場合が多い。その解決法として、数値的な逆方向モデルの採用が考えられる。数値逆モデルに必要な分岐処理の仕組みを開発した上で、具体的な適用例を設定して逆方向シミュレーションを実現し、その効果を調べることを本研究の目的とする。

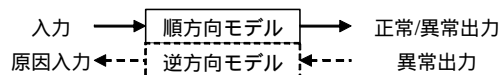


図1 シミュレーションモデル

3. 研究の方法

(1) 逆方向シミュレーションに関して、これまでに、以下のような成果等が得られている。

逆方向シミュレーションの構成法

順方向によるシミュレーションモデルを作成し、その要素間の信号の流れを形式的に逆流させることで逆方向シミュレーションを実現することができる。

シミュレーション要素間の通信表現

UCF と呼ぶ XML 形式によるデータ表現を使うことで、シミュレーション要素間の柔軟な情報伝達が可能になる。

範囲信号の採用

シミュレーション要素間を逆方向に伝達する信号は、逆計算の性質上、一般に多値化する。それを網羅的にしかも有限回数処理で実現するため、下限と上限で限定する範囲信号を使って信号を表す方法を考案した。

シミュレータ実現フレームワーク

Scala 言語とその Actor 機能を使って、順方向及び逆方向のシミュレーションが可能な基本シミュレータを作成した。シミュレーション要素はオブジェクト化し、

オブジェクトの生成、相互通信の形成、分散処理などの機能を簡単に活用できるプログラム作成方法を開発した。

(2) 本研究では、それらの成果の上で、以下の各テーマに順次、取り組んだ。

数値逆モデル生成方法

正確なモデルを作成できない場合や、逆算が容易でないモデル要素に対して、実測等に基づいて数値順方向モデルを表形式で作成する。それから逆算表を作って数値逆モデルを生成する方法を試みる。

場合分け分岐処理方法の確立

2 入力 1 出力要素などを逆方向にシミュレートするには、2 入力それぞれの範囲を限定し、場合分けして、可能性の有無をシミュレーションしていくことが必要になる。そのためには、場合分けと、場合分けごとの結果を判定しながら、シミュレーションを実行していく処理機能が必要である。その基本となる仕組みを確立する。

組み合わせ範囲信号

場合分けの分岐では、それぞれの範囲に依存して、各シミュレーション要素で条件適合の判断をする必要がある。そのため、信号を逆流させるとき、関係するすべての信号を含めて伝達する必要がある。それを UCF による組み合わせ信号として実現する。

ダイナミックプライシングへの適用

節電方策として検討されている電力料金の動的設定について、システム的な問題が懸念される。従来の研究で検討されてきたモデルでは、簡単な数式モデルを使用しているため、評価結果の妥当性に疑問が残った。そこで、本研究の数値逆モデルを採用すると、より実際のシミュレーションが可能となることを示す。

過渡応答の逆方向シミュレーション

表形式の数値モデルは静的システム要素のモデルとしては妥当であるが、時間変化をするシステム要素には不十分である。一般的な時間変化を含むシステム要素は数値インパルス応答でモデル化できるが、逆方向シミュレーションではインパルス応答の逆計算が必要になる。通常の信号処理ではマッチトフィルタ方式によるデコンボリューションが行われるが、より精度の高い結果の得られる逆方向シミュレーションによるデコンボリューションを試み、その有効性を確認する。

範囲精密化と計算量、計算精度の評価

場合分けのとき、範囲信号で設定する範囲幅をどう設定するかによって結果の精度が決まるとともに、計算時間に影響することになる。その状況を評価し、シミュレーションを行うときの基本指標となるデータを収集する。

4. 研究成果

(1) 数値逆モデル生成方法

ダイナミックプライシングに関連し、室温と電気料金に依存する人間の暖房操作判断のモデル化を例にする。まず順方向モデルで、室温範囲と料金値に対して、暖房機の強度設定を決める2次元の表1を作る。その表から、逆方向モデルとして、強度設定を与えると料金値と室温範囲の組み合わせを出力するための表2を作成する。

料金値と可能性のある室温範囲をひとつの組で出力することもできるが、そうすると逆シミュレーションが粗くなり、ほとんど有意義な結果が出せなくなる。そのため、順方向モデルに可能な限り近い組み合わせを、複数のケースとして場合分け処理をして、シミュレーション実行を行えるようにする。

表1 順方向ユーザモデル

room temperature	switch position		
	price=11	price=22	price=44
0	3	3	3
5	3	3	3
10	3	3	2
15	3	2	1
20	2	1	0
25	0	0	0

表2 逆方向ユーザモデル

switch position	room temperature range		
	price=11	price=22	price=44
0	22.5 - 8	22.5 - 8	17.5 - 8
1	22.5 - 22.5	17.5 - 22.5	12.5 - 17.5
2	17.5 - 22.5	12.5 - 17.5	7.5 - 12.5
3	- 8 - 17.5	- 8 - 12.5	- 8 - 7.5

(2) 場合分け分岐処理方法の確立

場合分け(ケース)に伴う処理を行うため、次のシミュレーション要素間信号を作成した。

“branch” 信号

逆方向処理で分岐が必要になった要素(分岐要素)が、全要素に状態記憶などの分岐準備を促す信号である。同時に、分岐要素の名前と順序番号で構成した分岐番号を生成し、同じ要素の分岐も含め、多重分岐の処理を可能とする。

“clearCase” 信号

分岐後のケース処理開始準備を通知する信号である。受け取った要素は、初期状態を“branch”信号で記録した状態にする。

“nextCase” 信号

現在処理中のケースが完了もしくは条件破綻したとき、現在の処理を、途中結果を含めて破棄することを指示する。

“branchCompleted” 信号

現在の分岐番号の全ケースの処理が完了したことを伝える信号である。現在の分岐番号に伴う状態記録を破棄し、以前の分岐番号の処理がスタック保存されていれば、それに復帰することになる。

以上の信号は、各要素とシミュレーション管理要素 sim との間で送受信を行う。必要に応じ、sim が各信号をすべての要素に配分するとともに、各要素は完了応答を返す。

(3) 組み合わせ範囲信号

例えば、図2の user 要素から price 価格制御要素への信号は以下のように表現した。

```
<price><s>user</s><temp>-Infinity,7.5</temp>44,44</price>
```

<s>タグ内部はこの信号の発信元、44 から 44 は電気料金範囲(円/kWh)の情報であるが、そのときの付随条件が室温は - から 7.5 度の範囲であることを表現している。もしこの信号をさらに逆流させていったとき、室温が 7.5 度以下ということはありえない、という状況が発生したとき、この信号の状況は起こりえない(条件破綻)ということになる。

(4) ダイナミックプライシングへの適用

図3のような構造で、ユーザの電力使用量が增大すると電気料金を上昇させ、ユーザの節電を促す方法が検討されている。この構成で逆方向シミュレーションを評価するため、電力使用量を設定すると、その状態が起こりえる室温を逆方向シミュレーションで求めた(図4)。モデルとしたヒータでの消費電力は強度に対応する4値しか取りえないが、それを含むハッチングした範囲が可能性のある範囲として、求まっている。このときの電力範囲の幅は0.5kWであったが、それを小さくしていくと、範囲はより狭められていき、精度を任意に上げることも可能である。

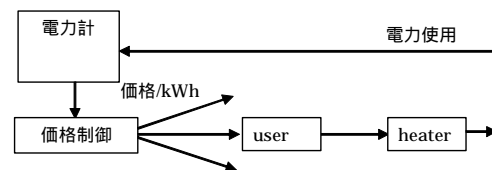


図2 ダイナミックプライシング順方向図

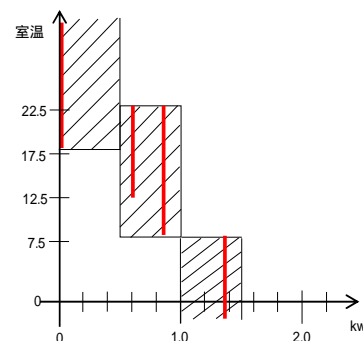


図3 逆方向シミュレーション結果図

(5) 過渡応答の逆方向シミュレーションより実際のダイナミックプライシングの検討を行うとすると、電力使用効果、例えば室温変化のモデルを組み込む必要がある。順方向シミュレーションの室温変化モデルは単純(図4)であるが、逆方向ではデコンボリューションを行う必要がある。順方向の積分モデルを作成し、信号を逆流させることで逆方向モデルが作成できるが、時間のずれた合流があるため、そのまま逆方向にすると、分岐を時間ごとに行う必要が発生し、計算量が増大する。

このとき、時間遅れ要素の部分のみ順方向処理として、逆方向シミュレーションの中に組み込むと、時間ごとの分岐が不要にできることを発見した。同時に、2方向からの信号の到着待ち合わせ機能を組み込み、信号同期も実現した。このハイブリッド法で、室温変化結果から、熱源であるヒータの動作時間を決める計算を行った。実測データに対しても、誤差はあるが、おおよそ実際の値と一致する結果が得られ、有効性が示せた。

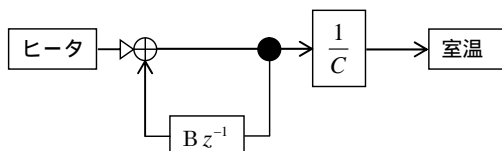


図4 ヒータ加熱による室温変化シミュレーション

(6) 精密化と計算量、計算精度の評価
精密化と計算量等の評価を、図5に示す有限インパルス応答(FIR)での逆方向シミュレーションを使って行った。FIRは一般的なシステム応答モデルであるので、その逆方向シミュレーションが実現できれば、広範な逆方向シミュレーションが可能になったと言える。

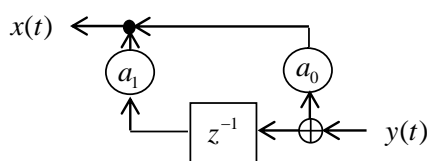


図5 FIR 応答の逆方向モデル(一次の例)

範囲精密化と計算量の関係
分岐点の数を b 、各分岐での場合分け数を m とするとおおよそ m^b に比例する計算量になる。範囲を2分割して精度を上げると 2^b 倍時間がかかることになる。逆シミュレーションを開始するときの逆流データにノイズがある場合、開始要素の範囲分割幅がそのノイズより小さくなると、計算すべき場合の数が急速に増加する。しかし、得られる最終結果は、ノイズがないときと大差ない。ノイズによりシミュレーションモデルに合わない場合は条件破綻により除外され、可能性の

ある範囲としての最終結果には残らなくなるからである。

シミュレーションモデルと実測系のずれが存在した場合の逆方向シミュレーションでは、範囲分割を細かくしていったモデルのずれが問題になるレベルになると、可能性のある入力系列が存在しない、という結論になる。したがって、範囲分割を細かくしていくことで、モデルの適合範囲が判断できる。

以上の通り、数値逆モデルと分岐処理により逆方向シミュレーションの実用性を高めることができたと考えている。今後、機能充実を図りながら、様々な分野への応用を展開していきたい。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計3件)

Yukio Hiranaka, Toshihiro Taketa and Shinichi Miura, Hybrid Backward Simulator to Determine Causal State Changes, Proc. XXI IMEKO World Congress, 2015.8.31-9.4, Prague(Czech).

Yukio Hiranaka, Houjin Sakaki, Kenta Ito, Toshihiro Taketa and Shinichi Miura, Numerical Backward Simulation Model with Case Branching Capability, Proc. 4th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies Technologies and Applications, 2014.8.30, Vienna(Austria).

Yukio Hiranaka, Toshihiro Taketa and Shinichi Miura, Case Branching Backward Simulator for Integer Factorization, Proc. 8th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation, 2013.9.11, Cardiff(UK).

[その他]

ホームページ等

<http://eatz.yz.yamagata-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

平中 幸雄 (HIRANAKA, Yukio)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：40134465

(2)連携研究者

武田 利浩 (TAKETA, Toshihiro)

山形大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：90236472

(3)研究協力者

三浦 信一 (MIURA, Shinichi)

榊 法盡 (SAKAKI, Houjin)

伊藤 健太 (ITO, Kenta)