

有限状態マシン (FSM) で表されるシステムの 複雑度の評価について

若杉忠男

若杉情報技術コンサルタントオフィス
〒251 神奈川県藤沢市片瀬山3-11-1

有限状態マシン (FSM) で表現されるシステムについて、パスの個数をその長さ順に並べたベクトルを考える。ここでパスとは遷移のシーケンス、長さとは遷移の数である。パスの個数はシステムに含まれるループの数とその組合せ方によって変わるが、このベクトルの各要素をパスの長さの簡単な関数で近似できる。この関数はループの個数や組合せ、パスの増加傾向などを表す。したがってシステム複雑度の指標となる。さらにこれはシステムの試験に使う試験項目の数と関係付けられる。これをISOで開発したトランスポートプロトコルの試験スイートに適用して試験項目数を推定し、システムの複雑度の指標として有効なことを示す。

On estimation of complexity of systems
that are described by FSM

Tadao WAKASUGI

WAKASUGI Information Technology Consultant Office
3-11-1 Kataseyama Fujisawa-city, 251 Japan

About systems described by FSM, the number of paths and lengths of them are studied. Here, path is a sequence of transitions. The number of paths are varied depend on the numbers and configurations of loops of the system, and they are approximated by simple functions. The functions show the numbers of paths, increasing rate of them, and system configurations. Then these functions can be used as a metric of complexity of systems. Applying this metric to test suites of Transport layers of conformance test suites, the numbers of test cases can be estimated.

1. はじめに

通信プロトコルなどのようにFSM（有限状態マシン）の状態遷移図で表されるシステムは多い。これらシステムの複雑度とそのシステムに対する試験項目の件数の関係について考察する。

システムの複雑度の指標については、リンク（ステートメント）数、ノード/スイッチ数、サイクロマチック数などがある。しかしリンク数やノード数は、システムの規模を示すが、システム構造の複雑さなどは表現されない。たとえば、ループを沢山含むシステムは複雑で、少ししか含まないシステムは簡単であると考えられるが、リンク数やノード数ではその区別はできない。一方サイクロマチック数は次の式で表される [1]。

$$\begin{aligned} \text{サイクロマチック数} = \\ (\text{リンク数}) - (\text{ノード数}) + 2 \quad (1) \end{aligned}$$

これは、リンクとノードの差だけが評価の対象となり、システムの規模は示さない。

筆者は、システムの複雑度の指標と必要な試験項目の数は関連付けられなければならないと考え、ISOで開発したトランスポート試験スイートを対象に、試験項目の複雑度と必要度の関係を分析してきた。すなわち、試験項目の質を考え [2]、その複雑度を定義し [3]、試験項目の必要度という概念を提案して疑似カバレジという考えを示した。本論文はこれらの論文の思想を発展させたもので、ここではシステムの複雑度を対象として考察をすすめる。

まずFSMで表現したシステムについてパスの個数が割合簡単な数式で表現できることを示す。そしてそれがシステムの複雑度の指標になりかつ試験項目数との関係を表現できることをISOの適合性試験スイートに適用して示す。

2. パスと連結行列

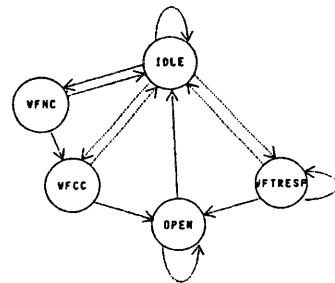
有限状態マシンはノードとそれをつなぐリンクからなる。ノードは一つの状態 (state) を表す。

リンクはエッジとかブランチとかアークなどとも呼ばれ、あるノードから他のノードにリンクを通して遷移 (トランジション) が起きることを表す。遷移はある状態にある入力を与えると起き、一般には同時に出力が生じる。まず前提として次の定義または仮定をする。

(1) 試験とは、各状態に対して適当な入力データを与えて遷移を起こさせ、予期するような出力と遷移とが生ずることを確認することである。

(2) システムには到達すると試験の終了となるノードがあり、それをアイドルノードという。FSMの各ノードからアイドルノードには到達可能である。

(3) パスとは一連の遷移の連なりで、任意のノードを出発点としアイドルノードで終了する。パスを構成する遷移の数をパスの長さという。



A. State Transition Diagram

Idle WFNC WFCC Open WFTRESP

Idle	1	1	1	0	1
WFNC	1	0	1	0	0
WFCC	1	0	0	1	0
Open	1	0	0	1	0
WFT.	1	0	0	1	1

B. Connection matrix

図1 トランスポートクラス0の状態遷移図

(4) 試験項目はパスに対応して作成され、パスの個数と試験項目の件数には比例関係があるとす
る。

F S Mシステムの長さLのパスの個数PLは次の
ようにして求めることができる。まずF S Mの遷
移を連結行列で表現する[4]。この行列はF S Mの
ノードの数をS個とすると、各ij要素はノード
iからノードjへとH本のリンクがつながってい
るときにH、リンクのない場合は0としたS×S
行列である。図1Aにトランスポートクラス0のF
S Mの状態遷移図を示す。また図1Bに図1Aに対
する連結行列を示す。

この行列をMとすると、長さLのパスはMのL
乗で求められる。詳細は省略する。

3. ループとパス

ここでパスの個数に対するループの影響を考え
る。各ノードを出発点とした長さLのパスの数P
をPLと表わす。このPLの値はループの個数とそ
の組合せに大きく影響されて変化する。

ループの組合せについては、次のような種類が
考えられる[4]。

- a. 単一ループ : ループが1個しかないもの。
- b. 並列型ループ : ループが並列になっている
もの。
- c. 直列型ループ : ループが直列につながっ
ているもの。
- d. 重畳型ループ : 一つのノードにいくつかの
ループが付いているもの。
- e. ネスト型ループ : ループの中にループが含ま
れているもの。
- f. 無秩序型ループ : ループの途中で他から飛び
込んで来たり、飛び出したり、ループの分岐、合流、
からみあいなどがあるもの。

ここで簡単な例について検討する。紙面の都合
で証明は省略する。

(1) F S Mがループを含まない場合には、L→

大のとき $PL \rightarrow 0$ となる。

(2) 単一ループの場合には、L→大のときに P
 $L \rightarrow Const.$ またはサイクリックにいくつかの値を
とる。

(3) 並列ループの場合には、全体のループから
生ずるパスの個数は、個々のループから生ずる
パスの個数の和になる。

(4) ループを直列にK個含み、かつこれらのル
ープは分岐点以外にノードを含まない(図2D)
とすると、長さLのパスの個数PLは、Lが大な
ときにLのK-1次の多項式で近似できる。

たとえば、

$K=1$ なら $Const$

$K=2$ なら $L+1$

$K=3$ なら $(L+1)(L+2)/2$

$K=4$ なら $(L+1)(L+2)(L+3)/6$

(5) 重畳型ループでは、分岐点以外にノードを
持たないループが、一つのノードにK個くっつ
いていて(図2E)、K種の中から順序を考慮
し重複を許してL個を選択する問題となり、P
Lは K^L のオーダーで増加する。このループに分岐
点以外のノードがある場合は一般に増加速度は
遅くなる。たとえば図2Fのようにループにノ
ードが二つある場合には、ほぼ $K^{L/2}$ のオーダーで増
加する。

(6) ネストされたループの場合、すなわちル
ープの中にループがある場合(図2G)には重畳型
に近いが、はじめに外側のループを経由しなけ
れば内側のループを実行できず、最後に外側の
ループを実行しなければ終わらないという制約
があるので、重畳型よりも少ない個数になる。
実際に図2Gの場合にはほぼ $PL=5 \times 1.6^{(L-1)}$ と
なることが、連結行列による計算結果から分か
っている。

4. パス関数の例

前記のPLをパス関数と呼ぶ。ここでISOで開
発した適合性試験のトランスポートクラス0, 2,
4[5]およびFTAMのイニシエータ側のファイル
レジーム確立サービス[6]について、パス関数を実

表1 パス関数 PL

	PL
Transport	
Class 0	$10+4L$
Class 2	$6+8L+2L^2$
Class 4	$(54+62L+23L^2+10L^3+L^4)/6$
FTAM:INIT.	$23.1 \times 2.22^{(L/2)} \times 1.63^{((L-1)/2)}$

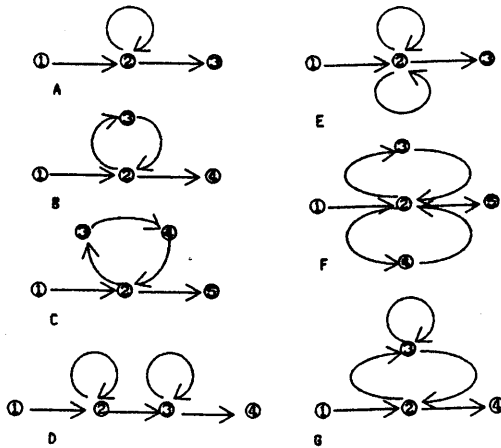


図2 ループを含む状態遷移図の例

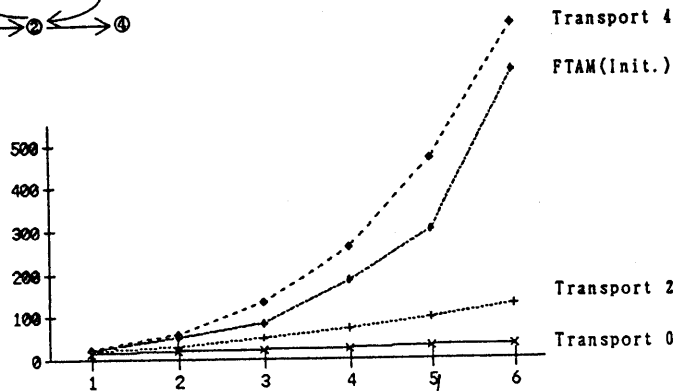


図3 バスの長さとの関係

際に求めて表1に示す。求め方は、トランスポートについては連結行列で求めた数値にLが大なるところで一致するように多項式を定めた。FTAMについては、連結行列で求めた値から式の形を推定して求めた。ここに[・・]は・・を計算して小数点以下を切り捨てて整数にすることを表す。

トランスポートプロトコルの場合には長さ3以上では完全に一致し、FTAMも四捨五入程度の誤差で一致する。

連結行列で求めたPLの値を図3に示す。これを見ると、トランスポートのクラス0, 2, 4の複雑度の差が明確に見て取れる。またトランスポートのクラス4とFTAMのイニシエータ側との増加速度はほぼ同じになっており、関係のないこの二つのシステムの複雑度が、この評価法のもとで

はほぼ同じになるという興味深い結果となった。

このPLの式とグラフから、次のことが分かる。

- ・FSM全体をカバーするのに必要なパスの数
- ・FSMのパスの個数の増加の傾向(増加速度)

5. システム複雑度と試験項目数

ここでこのパス関数の実用性を実証するために、OSIのトランスポートレイヤの適合性試験スイートの試験項目数の推定を行う。

まずトランスポートシステムの複雑度を示す数値と試験項目数[7]とを比較して表2と図4に示す。ノード数、サイクロマチック数と試験項目数とは、数値の大きさはもちろんであるが傾向も一致しない。すなわちこれらの指標は、試験項目数の推定には使えそうもない。

表2 トランスポートレイの複雑度と試験項目数

Class	0	2	4
Complexity			
No. of Nodes	5	7	8
No. of Links	13	19	25
Cyclomatic No.	10	14	19
No. of Test case			
Capability Test	37	105	117
Total Val. Test	53	154	199

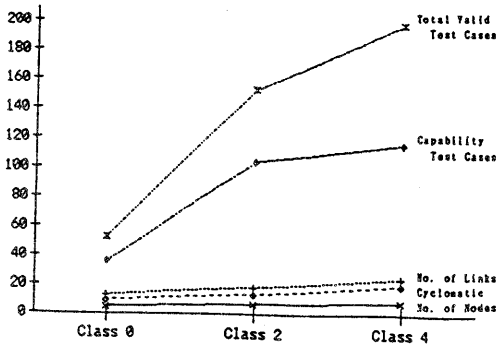


図4 トランスポートレイの複雑度と試験項目数

ここで試験について次のようないくつかの前提をおく。

- (1) 試験の目標はパスの列 {P_i} のすべての正しさを確認することである。
しかしこのようなことは実際には不可能であるので、さらに次のような仮定をする。
- (2) 一般に試験項目は {P_i} の短い方から実施される。したがって {P_i} の短い方の数項についてのパスのカバレッジを評価すれば、試験の質の評価ができる。
- (3) パスと試験項目の数の間には、次のような比例関係が成り立つとする。
長さLのパスのカバーに必要な試験項目数

$$= \text{長さ} L \text{ のパス数} \times E \quad (2)$$

ここに

$$E = \text{機能試験項目数} A / \text{リンクの個数} P_1 \quad (3)$$

とする。したがって長さLのカバレッジC_Lは、

$$C_L = \text{長さ} L \text{ のパスに対する試験項目数} / (P_L \times E) \quad (4)$$

$$\text{全試験項目数} = \sum (P_L \times E \times C_L) \quad (5)$$

などが言える。

(3) 式の [機能試験項目A] としては、OSI 適合性試験の場合プロトコルの機能を記述した PICS (プロトコル実装適合性記述書) から導かれた機能試験項目を採用する。(4) 式の [長さLのカバレッジ] については、この定義では1を越すこともありうるがその時は切り捨てて1にする。

実際のISOで作成したトランスポートの適合性試験スイートを見ると、長さ1のものが多く長さ3以上のものは全体の7~20%である。試験項目の件数の大ざっぱな推定値として、C₁=1, 長さ3以上のパスカバレッジはすべて=0とすると、次式が得られる。

$$\text{試験項目数の推定値} = A + P_2 \times E \times C_2 \quad (6)$$

これは機能試験項目の件数を基準として、長さ2のパスカバレッジC₂をいろいろ変えてみるという式である。これをOSI適合性試験のトランスポートの試験スイート[7]に適用し、C₂=0.2~0.4と変えた結果を表3と図5に示す。C₂=0.3とすると有効な (VALID) 試験項目数とほとんど一致し、誤差2%以下となる。したがって(6)式は試験項目の構造をよく表現していると見てよいであろう。すなわち、本論文のシステム複雑度指標は、試験項目の件数の分析に使用できるといえる。

6. まとめ

FSMで表現されるシステムについて、本研究により

- (1) ループの個数とパスの個数の関係を把握した
- (2) システムの複雑度と試験項目の数とが関連づけられた

表3 試験項目の件数とパス数の関係

Class	0	2	4
Test case			
Capability A	37	105	117
Total Valid	53	154	199
Estimation			
A+P2*0.2*E	47.25	139.26	174.10
A+P2*0.3*E	52.37	156.39	202.64
A+P2*0.4*E	57.49	173.53	231.19

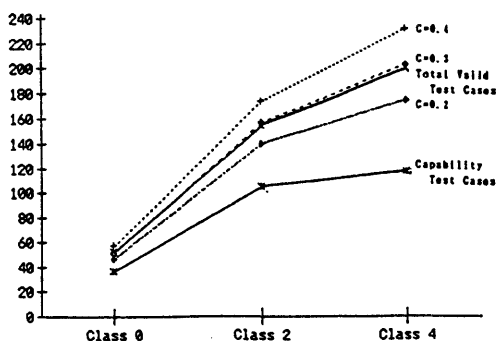


図5 試験項目の件数と推定値

(3) OSI適合性試験のトランスポートの試験スイートの構成を分析できたと考える。

またこの分析法で、トランスポートのクラス0/2/4の複雑度の違いが明確になり、一方FTAMとトランスポートクラス4の複雑度がほぼ同じと考えられるという興味深い結果が得られた。

なお、(6)式により有効試験項目の数を推定しよしい結果を得たが、筆者はこれを試験項目の推定の式というよりも、試験項目の構造の分析のための式と考えている。

今後の研究の方向としては、こういう分析方法の妥当性と有効性を検討し、試験スイートの必要

度充足率の評価に使うことを予定している。またこの複雑度指標をシステム設計の評価に使うことも検討したい。特に構造化設計と複雑度の関係を分析したいと考える。

謝辞

本研究は、東大電子情報工学科斉藤忠夫教授他の多くの人の励ましに支えられたものであり、ここにそれを深く感謝いたします。

文献

- [1] Geoffrey K. Gill, Chris F. Kemerer: "Cycloomatic Complexity density and Software Maintenance Productivity", IEEE Trans. Software Eng. VOL. 17, NO. 12, pp1284-1288, DECEMBER 1991.
- [2] 若杉忠男: "OSI適合性試験スイートの評価法—マルチトランジションカバレジ", 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, pp. 111-120, (1994-10)
- [3] 若杉忠男: "OSI適合性試験項目の複雑度による評価", 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, pp. 19-24, (1994-12)
- [4] Boris Beizer: "ソフトウェアテスト技法", 小野間, 山浦訳, 日経出版, pp. 331-345, 1994年2月.
- [5] ISO/IEC JTC1/SC 6/WG 4: "TRANSPORT TEST MANAGEMENT PROTOCOL SPECIFICATION" N507, (1989-04-26).
- [6] ISO 8571-3, Information processing systems - Open systems interconnection - File Transfer, and Access and Management -, part 3: File Service Definition, (1988-10-01).
- [7] PT19@00181003: "T0CONSCS, T2CONSCS, T4CLNSCS", ITEX-DE2. 1, (Jan. 14 1994).