

【電子情報通信学会フェロー受賞記念講演】

オートマトン・言語理論・学習理論と 組合せ最適化の研究及び教育

富田 悦次[†]

[†] 電気通信大学 電気通信学部 情報通信工学科
〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
E-mail: †tomita@ice.uec.ac.jp

あらまし オートマトン, 言語理論, 学習理論と組合せ最適化問題の研究と教育に関して, 筆者らの研究グループが取り組んできた幾つかの主な成果と, 電気通信大学における関連した研究体制の現況について述べる. 更に, 最大クリーク抽出アルゴリズムの最新成果の一部も示す.

キーワード オートマトン, 言語理論, 学習理論, 組合せ最適化, 研究, 教育, 最大クリーク

【IEICE Fellow Memorial Talk】

Studies and Education on Automata · Formal Languages · Learning Theory and Combinatorial Optimization

Etsuji TOMITA[†]

[†] Department of Communication Engineering, The University of Electro-Communications
Chofugaoka 1-5-1, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan
E-mail: †tomita@ice.uec.ac.jp

Abstract We present some selected results on automata, formal languages, learning theory, and combinatorial optimization in our research group. Also added is a newest result for finding a maximum clique.

Key words Automata, Formal Languages, Learning Theory, Combinatorial Optimization, Studies, Education, Maximum Clique

1. はじめに

この度授与された, 栄えある電子情報通信学会フェロー称号は, 筆者の研究室卒業生・現役学生諸君をはじめ, 学内外にわたって一緒に協力して下さった方々の研究及び教育の成果全体を代表していただいたものと認識している. 従って本稿では, これらの共同研究あるいは関連研究, 及び教育, 更には電気通信大学における最近の関連状況についても, 簡単に紹介させていただく.

合わせて, 最大クリーク抽出アルゴリズムの極く最新の成果の一部も示す.

2. オートマトン・言語理論・学習理論

筆者が東工大榎本肇教授(現・名誉教授), 堂下修司助教授(当時・現・龍谷大教授・京大名誉教授)のご指導の下に, オートマトンの自動構成・適応的修正問題に取り組み [1], [2] などの結果を発表した当時, いわゆるこのような「学習理論」に従事していたのは, 国内では他に有川節夫教授(九大)などほんの一にぎりであり, 国際的にも未だ極く少数であった. しかし, これらの結果はパターン認識機構の実現手段としても関心を呼んだ. これらにおいて, オートマトンを構成するために必要十分な「代表記号列集合」

の概念を与え、また [2] においては、後程 Angluin によって発表された正則言語の MAT 学習 [3] における主要な概念を含んでいた。

この学習方式においては、オートマトンの(部分的)等価性判定(より直接的には、非等価性の判定とその証拠(witness)の抽出)が重要となる。決定性有限オートマトンよりも上のクラスである決定性プッシュダウンオートマトン(DPDA)においては、当判定問題は未解決であったが、Valiantの博士論文[4]の結果等々、いくつかの部分クラスに対して巧妙な手法により次々と肯定的結果が与えられ、国内においても、谷口健一教授(阪大)ら[5]、大山口通夫教授(三重大)ら[6]などから精力的に成果が発表され、大きい関心を集めていた。

これに対して、筆者はそれまでの世界の大勢とは逆に、出来る限りアルゴリズムの単純さを追求した結果、新しく[7]における方式を確立した。その単純さは、同論文 Abstract中の次の文章で表すことが出来るが、これは査読者の評価をそっくりそのまま引用させていただいたものである。

“This is the first time the branching algorithm has been used to give such a general decision procedure without ever “mixing” the two languages in question. In other words, it deals with only the equivalence equation whose left-hand side consists of a pure reachable configuration of one dpda and whose right-hand side that of the other”

この等価性判定法は更に効率化が可能であり[8]、具体例として図1. 上部の推移規則 δ_1, δ_2 を持つ単純決定性プッシュダウンオートマトン M_1, M_2 に対する等価性判定過程結果を、図1(a)(文献[7], p.222, Fig.6より引用)及び(b)(文献[8], p.4, Fig.2.1より引用)に示す。従来他の手法による同じ問題に対する判定過程結果(たとえば文献[9], p.413, Fig.11.9)においては、判定木の節点数が25で、しかも、等価式中には M_1, M_2 のプッシュダウン記号(非終端記号)が混合(“mixing”)した記号列が出現している。これらを比較すると、新しく[7],[8]において提唱した方式の単純さ、効率性が直観的に理解していただけるであろう。なお、これとは別のValiantらの流儀による手法は一層に複雑で、例題化困難である。

決定性プッシュダウンオートマトンに対する上記判定法は非常に単純であるので、直ちにある種の決

定性文脈自由文法同士の等価性判定法にも適用出来、[10]の結果を得ている。更に同手法は、出力機構を持った決定性プッシュダウン変換機に対しても統一的に拡張し、[11]として発表している。なお、そこで対象としている決定性プッシュダウンオートマトンに対する等価性判定の可解性の結果自体は既に[12]において発表していたが、そこでの手法、あるいは他で発表されている手法はいずれも非常に複雑であって、どの一つとして、極く単純な対象であっても具体的例題でアルゴリズムの流れを示すことは不可能に近かったが、[11]においては、図1とほぼ同様の単純な具体例を掲載している。

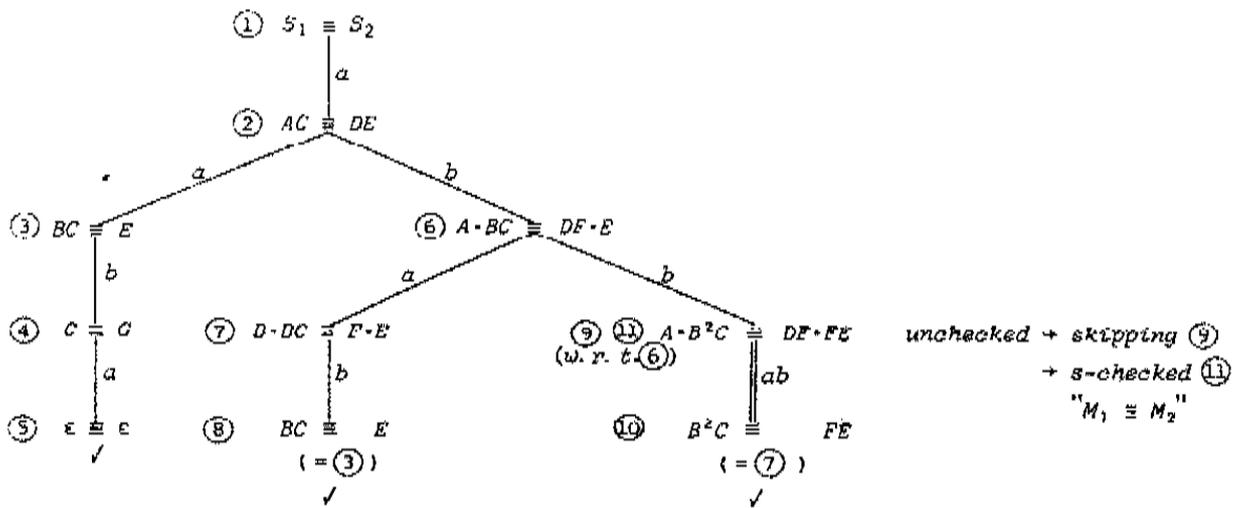
決定性プッシュダウンオートマトンの等価性判定問題の可解範囲拡張に関して、更に大山口教授が[13]などの優れた結果を示している。筆者らもその後[14]などの結果を発表しているが、この過程において、清野和司氏(現・東芝)の修士課程在学以来の貢献は大である。これらの努力にもかかわらず、当時この一般解は依然として非常な難問として残され、コンピュータ基礎理論ハンドブック[15]のChapter 2 Context-Free Languagesにおいても、それに関する主な結果として、[13],[11]、及びSénizerguesの[16]を挙げるに留める段階であった。

その後本問題に関しては、Sénizerguesが肯定的解決を全166ページの最終論文[17]として発表し、翌2002年にはそれに対して直ちにGödel賞が与えられたことは記憶に新しいことであろう。

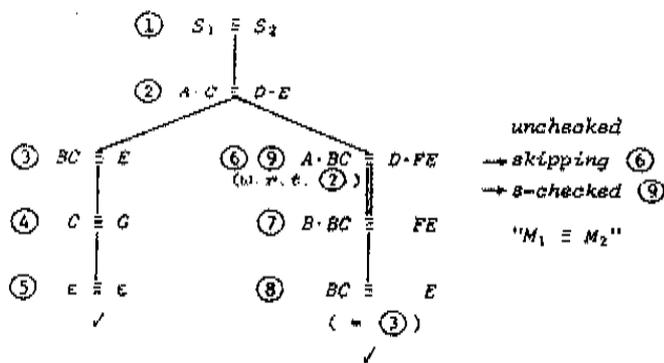
ここで、筆者研究室では、大学院博士課程の若月光夫氏(現・電通大)が対象を単純決定性プッシュダウンオートマトンに集中して更に詳細な理論を展開し、ある意味において計算量が多項式的である効率的等価性判定法を得[18]、更に同様の手法に基づいて、ある種の文法に対する効率的な包含性判定アルゴリズム[19]などを得ている。また樋口健氏(現・福井大)は、ある種のカウンタにおける判定問題に対して、[20]などの新しい幾つかの結果を得ている。

また、但馬康宏氏(現・農工大)は博士論文の中心的成果として、単純決定性言語を通常のMAT学習に近い形式で効率的に達成できる[21]との強力な結果などを示した。ここにおいて、単純決定性文法に対する効率的な等価性判定アルゴリズム[18]が非常に巧妙に活かされている。この様な等価性判定アルゴリズムの学習問題への適用は、この他にも展開が

δ_1	δ_2
$S_1 \xrightarrow{a} AC$	$S_2 \xrightarrow{a} DE$
$A \xrightarrow{b} AB$	$D \xrightarrow{b} DF$
$A \xrightarrow{a} B$	$D \xrightarrow{a} \epsilon$
$B \xrightarrow{b} \epsilon$	$E \xrightarrow{b} G$
$C \xrightarrow{a} \epsilon$	$F \xrightarrow{b} \epsilon$
	$G \xrightarrow{a} \epsilon$



(a) [7] Fig.6



(b) [8] Fig.2.1

图 1. 等值性判定例

期待される。

3. 教科書「オートマトン・言語理論」(森北出版)

筆者は電気通信大学へ着任以来、当初は通信工学科という情報系でない電気系の学科に所属していたため、上記のオートマトン・言語理論関係の卒業論文や修士論文の研究に先立っては、情報の基礎知識が無く慣れていない学生でも、極力自ら学習し易い様にと沢山の学習資料を作成してその準備に当てていた。そのような折に、飯島泰蔵教授(現・東工大名誉教授)より、森北出版・基礎情報工学シリーズの教科書執筆担当のお誘いをいただき、前記教材を基として、横森貴教授(現・早大、当時・電通大情報工学科助教授)にも加わっていただけてまとめ上げたのが本教科書 [22] である。本書の作成から校正においては、清野和司氏、若月光夫氏、樋口健氏を始め多くの学生・卒業生諸君に、少しでもより読み易くなる様にとの協力をいただいた。このような事情から、本書は理論的内容であるにもかかわらず非常に学習し易いとの評価をいただき、多くの大学、大学院等において教科書、参考書として利用していただいている。このため、出版以来ほぼ毎年改訂を伴った増刷を重ね、2003年2月には第14刷目となっている。この間2000年11月には、大学生協書籍ベスト20・工学部門の第7位にもランクされた。

なお、神戸大学工学部情報知能工学科の林晋教授にも本書を同学科講義用教科書として御利用いただいているが、更に movie なども取り込んだ講義用アニメ資料の力作を web 上 [23] に用意して授業を進められている。筆者も、林教授のご承諾の下において同資料を利用させていただいている。

本教科書を使用している筆者の授業では、本文において厳密な証明を省略してあるところや巻末の演習問題で解答詳細を(あえて)省いてある部分について、学生の演習問題などとして課し、詳細解答は後程別途プリント資料にて配布している。これらの詳細解答も、もし御入用ならば、遠慮なく筆者 (tomita@ice.uec.ac.jp)宛御請求いただきたい。

4. 組合せ最適化

前記において、たとえば具体例からの正則言語の学習過程は、文法における非終端記号をいかに組合せて最適に統合するかという問題として定式化することが出来、そこから最大クリーク抽出が重要となって、その研究も合わせて進めてきた。

当初発表の [24] に関しては、それと類似の最大クリーク抽出アルゴリズムが、それより5年後、筆者らと独立に Carrghan らにより発表され [25]、それを基にしたアルゴリズム df_{max} [26] が長らく国際標準として用いられている。前記 [24] は、その極く基礎的部分として [25] と同様の手法を既に提唱し、更にそれを高度化した手法を採用したアルゴリズムも含んでいた。

ここでは分枝限定法を基本的手法としてきているが、他所における研究においては巧妙な手法によって探索領域削減効果を強力に活かすことに多くの重点がおかれ、その処理のために大きい計算時間を要してしまうことにより、結果として広い範囲の対象グラフについて安定して高速となるアルゴリズムの構築は容易ではなかった。これに対し、筆者らは [24] のアルゴリズムを基礎として、逆に単純性を追求し、分枝限定のために要する計算時間とその効果とのトレードオフを適切に実現し、その結果を2003年7月の国際会議 DMTCs2003 において [27] として発表した。

本アルゴリズムは、現時点において知り得るどの最新アルゴリズムよりも幅広い対象において安定して非常に高速であり、DIMACS のベンチマークグラフの幾つかに対して他アルゴリズムよりも2,000倍以上、あるいは数百倍以上の高速性を実現している。これに対しては、

“This is a very good paper. The paper is clearly structured, with good results, and the simplicity on the proposed algorithm is an open invitation to jump coding and experimenting.”

等との評価が与えられている。

最大クリーク抽出最新アルゴリズム

その後、前記アルゴリズムは亀田宗克君の今年度卒業研究の一環としてより高速化され [28]、その後更なる改良結果を得ている。その最新改良版アルゴリズムを MCQ^0 とし、ランダムグラフに対する平均実行時間、分枝数(探索領域)の例を、各々表1, 2に示す(n は節点数, p は枝存在確率, ω は抽出された最大クリークサイズ)。また、特に MCQ^0 が他のアルゴリズムに対して高速性を発揮している DIMACS ベンチマークグラフに対する実行時間例を表3に示す(Density は枝密度)。実験状況は [27], [28] と同じく Pentium4, 2.2GHz CPU を用いた同様のものであるので省略する。ここで、New [32], Target [33]

表 1. ランダムグラフに対する平均実行時間 [sec.]

Graph			dfmax [26]	MCQ'	New [32]	COCR [31]
n	p	ω				
100	0.8	19-21	0.22	0.0199	0.10	0.24
	0.9	29-32	5.97	0.059	1.04	0.31
	0.95	39-46	40.94	0.019	0.31	
150	0.8	23	11.23	0.771		1.18
	0.9	36-39	1,743.7	7.59		1.83
	0.95	50-57	61,118.8	4.29		
200	0.6	14	0.46	0.12	0.27	0.82
	0.7	18-19	6.18	0.926	4.75	2.59
300	0.6	15-16	7.83	1.85	5.50	7.83
	0.7	19-21	233.69	30.89	179.71	
500	0.5	13-14	14.45	4.51	11.40	27.41
	0.6	17	399.22	79.94	288.10	
1,000	0.4	12	51.92	19.49	36.46	
	0.5	15	1,766.85	482.52		
3,000	0.3	11-12	1,116.54	598.58		
	0.4	14	71,256.66*	27,244.11*		

表 2. ランダムグラフに対する平均分枝数

Graph			dfmax [26]	MCQ'	COCR [31]
n	p	ω			
100	0.8	19-21	486,742	5,603	894
	0.9	29-32	13,618,587	10,797	343
	0.95	39-46	86,439,090	2,339	
150	0.8	23	21,234,192	167,387	19,754
	0.9	36-39	2,453,082	962,397	17,735
	0.95	50-57	$> 4.29 \times 10^9$	342,414	
200	0.6	14	728,151	36,786	16,747
	0.7	18-19	10,186,589	223,477	62,708
300	0.6	15-16	10,978,531	457,658	197,937
	0.7	19-21	341,044,352	6,117,129	
500	0.5	13-14	16,946,013	1,108,144	582,681
	0.6	17	469,171,354	15,699,473	
1,000	0.4	12	50,154,790	4,422,241	
	0.5	15	1,712,895,181	90,952,284	
3,000	0.3	11-12	713,859,610	75,163,975	
	0.4	14	$> 4.29 \times 10^9$	3,374,082,049	

表 3. DIMACS ベンチマークグラフに対する実行時間 [sec.]

Graph				dfmax [26]	MCQ ⁰	New [32]	MIPO [29]	SQUEEZE [30]	Target/10 [33]
Name	n	Density	ω						
c-fat200-5	200	0.426	58	444.03	0.00252	2.74	60.5	1.74	
c-fat500-5	500	0.186	64	2.73	0.017	3,664.16		49.5	
MANN_a27	378	0.990	126	>24hrs.	4.22	>3,500		1,524.2	
p_hat300-3	300	0.744	36	1,285.91	15.82			8,201.1	
p_hat500-2	500	0.505	36	219.37	4.99	150.5		5,330.7	>2,160
san200_0.9_3	200	0.900	44	>24hrs.	0.24		23.60	430.7	>2,160
san400_0.7_1	400	0.700	40	>24hrs.	2.34	>3,500			12.2
san400_0.7_2	400	0.700	30	>24hrs.	0.45	177.6	786.8		56.6
san400_0.9_1	400	0.900	100	>24hrs.	5.32			3,239.8	>2,160

は、各々2002年7月、2003年7月に発表された結果であり、それ以前の他のアルゴリズムに対する優位性を唱えているが、対象グラフに応じて一長一短があり、その様な意味において安定した高速性を発揮していない。なお、Target [33] では Pentium 450MHz CPU を使用しているが、実行時間更正用のデータが明示されていないので、両 CPU のクロック周波数比 $450/2,200 = 0.2045$ を更に約 1/2 倍して得られる値 1/10 を Target [33] の論文中的実行時間に乘じた値を Target/10 として表 3 中に参考値として掲載してある。

表 1, 2 などにより、アルゴリズム MCQ⁰ の全体的優位性が示される。なお、COCR は特に枝の存在確率が高い場合の最大クリーク抽出に焦点を絞ったアルゴリズムであり、表 2 に見られる様に分枝数の削減に関しては全面的に非常な優位性を発揮している。しかし、その削減のために要する大きい実行時間のため、総合的には枝の存在確率が非常に高い場合を除いては、かえって総実行時間は長くなっている。Target の実行時間 (ランダムグラフに対する実行結果は [33] 中に掲載されていない) は、時間更正のための Target/10 の値に更に数倍位の範囲内での変動を考慮しても (表 3 内の対象データだけに限らず)、MCQ⁰ の優位性に影響を与える程のものではない。

以上より、アルゴリズム MCQ の改良アルゴリズム MCQ⁰ は、他のアルゴリズムに対して一層確実な優位性を確立した。

これらのアルゴリズムの概念は、節点 / 枝に重みが付与されたグラフに対する重み最大クリーク抽出アルゴリズム、あるいは極大クリーク全列挙アルゴリズム、近似重み最大クリーク抽出アルゴリズム等

を始めとした組合せ最適化問題に拡張した結果を得ており、更に現在も改良を進行中である。なお、最大クリーク抽出問題のバイブルとも目される書物 [34] 中に、筆者らの成果も紹介されている。

以上のようなアルゴリズムの高速化達成により、その拡張も含めたアルゴリズム、あるいはそこにおける概念を利用することにより、様々な実問題解決に応用することが可能となり、次の様な共同研究の成果が上げられている。

- バイオインフォマティクスへの応用
【阿久津達也 教授 (京大), 他】[35], [36], [37]
- 画像処理への応用
(向きの変化に頑健な顔画像抽出)
【堀田一弘 助手, 高橋治久 教授, 他】[38]
- 量子論理回路設計への応用
(量子論理回路の深さ最小化)
【西野哲朗 助教授, 他】[39]
- DNA 配列設計への応用
【小林 聡 助教授, 他】[40]

5. 電通大 先進アルゴリズム研究ステーション

電通大における上記共同研究のプロジェクトに対し、「電気通信大学研究・教育活性化支援システム」による支援を大学より受けていたが、この成果の上に立って、本年 10 月より「先進アルゴリズム研究ステーション (代表者: 富田悦次, 副代表者: 西野哲朗)」という正式学内組織を設立した。これは、ニューラルネットワーク関係のアルゴリズムも含め、電通大における幅広いアルゴリズム関係者全体を結集している。

前記の共同研究プロジェクトのメンバーに対しては、昨年来下記のような受賞を得ている。

・ 富田悦次, 西野哲朗, 小林 聡, 戸田誠之助: “先進的アルゴリズムと新情報処理パラダイムの開発と応用・評価に関する研究”に対し, 船井情報科学財団より船井情報科学振興賞受賞(平成15年3月).

・ 鈴木純一, 富田悦次, 関 友和: “枝重み最大クリーク抽出アルゴリズムと実験的評価,” 情報処理学会研究報告(数理モデル化と問題解決研究会), MPS-42-12, pp.45-48 (2002) に対し, 講演者: 鈴木純一(発表当時, 電気通信大学・情報通信工学科4年, 卒業研究生)は情報処理学会より山下記念賞受賞(平成15年10月).

・ 西野哲朗: “量子計算量理論,” 電子情報通信学会論文誌(D-I), vol.J84-D-I, no.1, pp.3-17 (2001) に対し, 電子情報通信学会より電子情報通信学会ソサイエティ論文賞受賞(平成14年9月).

・ M. Arita, and S. Kobayashi: “DNA sequence design using templates,” New Generation Computing, vol.20, no.5, pp.865-877 (2002) に対し, New Generation Computing 誌より Distinguished Paper Award 受賞(平成14年5月).

今後, 当研究ステーション活動に対し, 暖かい御指導・御支援をいただければ幸いです.

謝辞 電子情報通信学会フェロー受賞に際し, 御推薦と多大な御尽力をいただきました, コンピューション研究会委員長・岩間一雄教授(京大)他, 関係各位, 及び, 及び恩師榎本肇名誉教授に厚く御礼申し上げます.

また, これまで多大の協力・貢献をしてきていただいている当研究室若月光夫助手, 清野和司氏, 藤井利昭氏, 樋口健氏, 但馬康宏氏, 新道美喜男氏, 田中亮氏, 木幡康弘氏, 山田義朗氏, 今松憲一氏, 関友和氏, 等々の歴代卒業生, 及び現学生で直接的にプロジェクトテーマを担当している鈴木純一君, 中村知倫君, 亀田宗克君, 他に感謝します. 更に, 共同研究を進めていただいている, 阿久津達也教授, 電通大・高橋治久教授, 西野哲朗助教授, 小林聡助教授, 堀田一弘助手, 他に深謝いたします.

なお, これまでに幾度か支給をいただいた文科省科学研究費補助金, 及び電通大研究・教育活性支援システムの支援に対し謝意を表します.

文 献

[1] H. Enomoto, E. Tomita, and S. Doshita: “Synthesis of automata that recognize given strings and

characterization of automata by representative sets of strings,” Proc. First USA-Japan Computer Conf., pp.21-27 (1972).

- [2] 榎本 肇, 富田悦次: “代表記号例集合による決定性有限オートマトンの適応的修正法,” 電子通信学会論文誌(D), vol.J60-D, no.10, pp.777-784 (1977).
- [3] D. Angluin: “Learning regular sets from queries and counterexamples,” Information and Computation, vol.75, pp.87-106 (1987).
- [4] L. G. Valiant: “Decision procedures for families of deterministic pushdown automata,” Ph. D. Dissertation, University of Warwick, Coventry (1973).
- [5] K. Taniguchi and T. Kasami: “A result on the equivalence problem for deterministic pushdown automata,” J. Computer and System Sciences, vol.13, pp.38-50 (1976).
- [6] M. Oyamaguchi, N. Honda, and Y. Inagaki: “The equivalence problem for real-time strict deterministic languages,” Information and Control, vol.45, pp.90-115 (1980).
- [7] E. Tomita: “A direct branching algorithm for checking equivalence of some classes of deterministic pushdown automata,” Information and Control, vol.52, pp.187-238 (1982).
- [8] E. Tomita and H. Tsuchiya: “Improvements on a direct branching algorithm for checking equivalence of DPDA’s,” Technical Report of IECE, COMP86-9, pp.1-10 (1986).
- [9] M.A. Harrison: Introduction to Formal Language Theory, Addison-Wesley (1978).
- [10] E. Tomita: “A direct branching algorithm for checking equivalence of strict deterministic vs. $LL(k)$ grammars,” Theoretical Computer Science, vol.23, pp.129-154 (1983).
- [11] E. Tomita and K. Seino: “A direct branching algorithm for checking the equivalence of two deterministic pushdown transducers, one of which is real-time strict,” Theoretical Computer Science, vol.64, pp.39-53 (1989).
- [12] 富田悦次: “一方が ϵ -動作なし空スタック受理式である決定性プッシュダウン変換器の等価性判定,” 電子通信学会論文誌(D), vol.J62-D, no. 7, pp.467-474 (1979).
- [13] M. Oyamaguchi: “The equivalence problem for real-time DPDAs,” J.ACM, vol.34, pp.731-760 (1987).
- [14] E. Tomita and K. Seino: “The extended equivalence problem for a class of non-real-time deterministic pushdown automata,” Acta Informatica, vol.32, pp.395-413 (1995).

- [15] J. V. Leeuwen: Handbook of Theoretical Computer Science, vol.B, Formal Models and Semantics, MIT Press, Cambridge/Elsevier, Amsterdam, Mass (1990) (広瀬健・野崎昭弘・小林孝次郎監訳: コンピュータ基礎理論ハンドブック, 丸善 (1994))
- [16] G. Sénizergues: "Some decision problems about controlled rewriting systems," Theoretical Computer Science, vol.71, pp.281-346 (1990).
- [17] G. Sénizergues: "L(A)=L(B)? decidability results from complete formal system," Theoretical Computer Science, vol.251, pp.1-166 (2001).
- [18] 若月光夫, 富田悦次: "単純決定性プッシュダウンオートマトンの等価性判定の改良分岐アルゴリズムとその最大時間計算量," 電子情報通信学会論文誌 (D-I), vol.J74-D-I, no.9, pp.595-603 (1991).
- [19] M. Wakatsuki and E. Tomita: "A fast algorithm for checking the inclusion for very simple deterministic pushdown automata," IEICE Trans. Information and Systems, vol.E76-D, no. 10, pp.1224-1233 (1993).
- [20] K. Higuchi, E. Tomita, and M. Wakatsuki: "A polynomial-time algorithm for checking the inclusion for strict deterministic restricted one-counter automata," IEICE Trans. Information and Systems, vol.E78-D, no.4, pp.305-313 (1995).
- [21] Y. Tajima and E. Tomita: "A polynomial time learning algorithm of simple deterministic languages via membership queries and a representative sample," International Colloquium on Grammatical Inference 2000, Lisbon, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1891, Springer-Verlag, pp.284-297 (2000).
- [22] 富田悦次, 横森 貴: オートマトン・言語理論, 森北出版 (1992).
- [23] <http://www.shayashi.jp/Courses/03/Automaton/lecturenotes.html>
- [24] 富田悦次, 藤井利昭: "最大クリーク抽出の効率化手法とその実験的評価," 電子通信学会論文誌 (D), vol.J68-D, no.3, pp.221-228 (1985).
- [25] R. Carraghan and P. M. Pardalos: "An exact algorithm for the maximum clique problem," Operations Research Letters. vol.9, pp.375-382 (1990).
- [26] D. S. Johnson and M. A. Trick, (Eds): Cliques, Coloring, and Satisfiability, DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, vol.26, American Mathematical Society (1996).
- [27] E. Tomita and T. Seki: "An efficient branch-and-bound algorithm for finding a maximum clique," Proc. Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science 2003, Dijon, Lecture Notes in Computer Science 2731, pp.278-289 (2003).
- [28] 亀田宗克, 富田悦次: "最大クリークを抽出するより高速な分枝限定アルゴリズム," 電子情報通信学会技術研究報告, COMP2003-48, pp.33-40 (2003).
- [29] E. Balas, S. Ceria, G. Cornuéjols, and G. Pataki, "Polyhedral methods for the maximum clique problem," pp.11-28 in [26] (1996).
- [30] J.-M. Bourjolly, P. Gill, G. Laporte, and H. Mercure, "An exact quadratic 0-1 algorithm for the stable set problem," pp.53-73 in [26] (1996).
- [31] E. C. Sewell, "A branch and bound algorithm for the atability number of a sparse graph," IN-FORMS J. Comput. vol.10, pp.438-447 (1998).
- [32] P. R. J. Östergård, "A fast algorithm for the maximum clique problem," Discrete Applied Mathematics, vol.120, pp.197-207 (2002).
- [33] V. Stix: "Target-oriented branch and bound method for global optimization," J. Global Optimization, vol.26, pp.261-277 (2003).
- [34] I.M.Bomze, M.Budinich, P.M.Pardalos, and M.Pelillo, "The maximum clique problem," in: Ding-Zhu Du and P.M.Pardalos, ed., Handbook of Combinational Optimization, Supplement vol. A, Kluwer Academic Publishers, pp.1-74 (1999).
- [35] D. Bahadur K.C., T. Akutsu, E. Tomita, T. Seki, and A. Fujiyama: "Point matching under non-uniform distortions and protein side chain packing based on efficient maximum clique algorithms," Genome Informatics 13, pp.143-152 (2002).
- [36] D. Bahadur K.C., T. Akutsu, E. Tomita, and T. Seki: "Protein side-chain packing: A maximum edge weight clique algorithmic approach," Proc. Asia-Pacific Bioinformatics Conference (to appear, 2004).
- [37] T. Akutsu, M. Hayashida, E. Tomita, J. Suzuki, and K. Horimoto, "Protein threading with profiles and constraints" (manuscript).
- [38] 堀田一弘, 富田悦次, 高橋治久, "最大クリーク抽出に基づく向きの変化に依存しない人物の顔検出," 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, vol.44, no.SIG14(TOM9) (印刷中).
- [39] 名久井行秀, 西野哲朗, 富田悦次, 中村知倫: "節点重み最大クリーク抽出に基づく量子論理回路の深さ最小化," 京大数理解析研究所講究録 1325, pp.45-50 (2003) .
- [40] S. Kobayashi, T. Kondo, K. Okuda, and E. Tomita: "Extracting globally structure free sequences by local structure freeness," Proc. DNA9, p.206 (2003).