

---

競合連想ネットの逐次学習法の変形と  
その区分的線形近似能力の非線形問題への応用

---

16300070

平成16年度～平成18年度 科学研究費補助金  
(基盤研究(B)) 研究成果報告書

平成19年6月  
研究代表者 黒木秀一  
九州工業大学 工学部 准教授

# 1 はしがき

本冊子は平成16年度～18年度科学研究費補助金(基盤研究(B);課題番号16300070)による「競合連想ネットの逐次学習法の変形とその区分的線形近似能力の非線形問題への応用」の研究成果をまとめたものである。

## 研究組織

研究代表者：黒木 秀一 (九州工業大学 工学部 准教授)

研究分担者：西田 健 (九州工業大学 工学部 助教)

(研究協力者：伊藤 勝美 (小松エレクトロニクス株式会社))

(研究協力者：三股 充 (小松エレクトロニクス株式会社))

(研究協力者：瀧川 康裕 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

(研究協力者：上野 貴雅 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

(研究協力者：荒木 緑広 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

(研究協力者：沢 美穂 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

(研究協力者：江口 絢子 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

(研究協力者：境 祐輔 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

(研究協力者：富崎 広章 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

(研究協力者：田中 信也 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

(研究協力者：桑原 大介 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

(研究協力者：根立 奈緒子 (九州工業大学 工学部 黒木研究室))

## 交付決定額 (配分額) (金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成16年度	1,600,000	0	1,600,000
平成17年度	1,000,000	0	1,000,000
平成18年度	1,000,000	0	1,000,000
総計	3,600,000	0	3,600,000

## 研究発表

### (1) 学会誌等

(1-1) 黒木秀一, 西田健, 瀧川康裕, バッチ学習型競合連想ネットとその性質, 計測自動制御学会論文集, 42巻8号, pp.916-925, 平成18年8月

(1-2) Shuichi Kurogi, Miho Sawa, Takamasa Ueno, Time series prediction of the CATS benchmark using Fourier bandpass filters and competitive associative nets, Neurocomputing (平成19年3月 accepted)

(1-3) 黒木秀一, 西田健, 競合連想ネットによる距離画像からの平面抽出, 日本神経回路学会誌 (発表予定)

(2) 口頭発表

(2-1) S.Kurogi, N.Araki, H.Miyamoto, Y.Fuchikawa, T.Nishida, M.Mimata, K.Itoh, Temperature Control of RCA cleaning solutions using batch learning competitive associative net, Proceedings of the 8th World Multi-Conference on Systems, Cybernetics and Informatics, Vol.V, pp.18-23, 平成16年7月

(2-2) S.Kurogi, M.Sawa, T.Ueno, Y.Fuchikawa, A batch learning method for competitive associative net and its application to function approximation, Proceedings of the 8th World Multi-Conference on Systems, Cybernetics and Informatics, Vol.V, pp.24-28, 平成16年7月

(2-3) S.Kurogi, T.Ueno, M.Sawa, Batch learning competitive associative net and its application to time series prediction, Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, CD-ROM, 平成16年7月

(2-4) S.Kurogi, M.Sawa, S.Tanaka, Strategies which we have used for NIPS04 regression problems 平成16年7月

(2-5) H.Tomisaki, S.Kurogi, N.Araki, T.Nishida, Y.Fuchikawa, M.Mimata and K.Itoh, Cross-validation of competitive associative nets for stable temperature control of RCA cleaning solutions 12th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.166-170 平成17年11月

(2-6) Y.Sakai, T.Nishida, S.Kurogi, A.Eguchi, Y.Fuchikawa, Piecewise linear approximation for range data using batch learning competitive associative net 12th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.202-207 平成17年11月

(2-7) S.Kurogi, T.Nishida, S.Tanaka, Y.Fuchikawa, Cross-validation and bootstrap for optimizing the number of units of competitive associative nets 12th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.410-415 平成17年11月

(2-8) S.Kurogi, D.Kuwahara, S.Tanaka, Ensemble of competitive associative nets and multiple K-fold cross-validation for estimating predictive uncertainty in environmental modeling, Proceedings of IJCNN 2006, CD-ROM, 平成18年7月

- (2-9) S.Kurogi, D.Kuwahara, S.Tanaka, Ensemble of competitive associative nets and a method to select an effective number of units, LNCS 4232, 13th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.698-707, 平成18年10月
- (2-10) S.Kurogi, S.Kuwahara, H.Tomisaki, T.Nishida, M.Mimata, K.Itoh, Ensemble of competitive associative nets for stable learning performance in temperature control of RCA cleaning solutions, NCS 4234, 13th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.563-571, 平成18年10月
- (2-11) N.Nedachi, S.Kurogi, Reproduction and recognition of vowels using competitive associative nets, SICE ICASE International Joint Conference, pp.1147-1151, 平成18年10月
- (2-12) S.Kurogi, S.Tanaka, R.Koyama, Combining the predictions of a time series and the first-order difference using bagging of competitive associative nets, Proceedings of the European Symposium on Time Series Prediction 2007, pp.123-131, 平成19年2月
- (2-13) S.Kurogi, R.Koyama, S.Tanaka, T.Sanuki, Forecasting Using First-Order Difference of Time Series and Bagging of Competitive Associative Nets, 20th International Joint Conference on Neural Networks (発表予定), 平成19年7月
- (2-14) T.Nishida, S.Kurogi, Y.Takemura, H.Fukumoto, S.Okada, Range Data Approximation for Mobile Robot by Using CAN2, 20th International Joint Conference on Neural Networks (発表予定), 平成19年7月
- (2-15) S.Kurogi, N.Nedachi, Y.Funatsu, Reproduction and Recognition of Vowel Signals Using Single and Bagging Competitive Associative Nets, International Conference on Neural Information Processing (発表予定), 平成19年11月

### (3) 出版物

- (3-1) S.Kurogi, M.Sawa, S.Tanaka, Competitive associative nets and cross-validation for estimating predictive uncertainty on regression problems, in J.Quiñonero-Candela et al.(Eds), Lecture Notes on Artificial Intelligence (LNAI) 3944, pp.78-94, 平成18年10月

研究成果による工業所有権の出願・取得状況  
なし

平成19年6月 九州工業大学 工学部 准教授 黒木秀一

# 目次

1	はしがき	i
2	研究目的	1
3	研究成果	3
3.1	競合連想ネットの逐次的学習法の変形とその検討	3
3.1.1	バッチ学習法	3
3.1.2	アンサンブル学習とバギング学習法	3
3.1.3	時系列差分を用いる学習法	4
3.2	非線形時変プラントの制御への応用	4
3.3	音声時系列の解析と認識への応用	4
3.4	距離画像処理への応用	4
4	研究のまとめと今後の展望	6
	謝辞	7
	研究発表論文	8
(2-1)	S.Kurogi, N.Araki, H.Miyamoto, Y.Fuchikawa, T.Nishida, M.Mimata, K.Itoh, Temperature Control of RCA cleaning solutions using batch learning competitive associative net, Proceedings of the 8th World Multi-Conference on Systems, Cybernetics and Informatics, Vol.V, pp.18-23, 平成16年7月	9
(2-2)	S.Kurogi, M.Sawa, T.Ueno, Y.Fuchikawa, A batch learning method for competitive associative net and its application to function approximation, Proceedings of the 8th World Multi-Conference on Systems, Cybernetics and Informatics, Vol.V, pp.24-28, 平成16年7月	15
(2-3)	S.Kurogi, T.Ueno, M.Sawa, Batch learning competitive associative net and its application to time series prediction, Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, CD-ROM, 平成16年7月	20
(2-4)	S.Kurogi, M.Sawa, S.Tanaka, Strategies which we have used for NIPS04 regression problems 平成16年7月	26

(2-5) H.Tomisaki, S.Kurogi, N.Araki, T.Nishida, Y.Fuchikawa, M.Mimata and K.Itoh, Cross-validation of competitive associative nets for stable temperature control of RCA cleaning solutions 12th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.166-170 平成 17 年 11 月 . . . . .	32
(2-6) Y.Sakai, T.Nishida, S.Kurogi, A.Eguchi, Y.Fuchikawa, Piecewise linear approximation for range data using batch learning competitive associative net 12th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.202-207 平成 17 年 11 月 . . . . .	37
(2-7) S.Kurogi, T.Nishida, S.Tanaka, Y.Fuchikawa, Cross-validation and bootstrap for optimizing the number of units of competitive associative nets 12th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.410-415 平成 17 年 11 月 . . . . .	43
(2-8) S.Kurogi, D.Kuwahara, S.Tanaka, Ensemble of competitive associative nets and multiple K-fold cross-validation for estimating predictive uncertainty in environmental modeling, Proceedings of IJCNN 2006, CD-ROM, 平成 18 年 7 月 . . . . .	49
(1-1) 黒木秀一, 西田健, 瀧川康裕, バッチ学習型競合連想ネットとその性質, 計測自動制御学会論文集, 42 巻 8 号, pp.916-925, 平成 18 年 8 月 . . . . .	54
(3-1) S.Kurogi, M.Sawa, S.Tanaka, Competitive associative nets and cross-validation for estimating predictive uncertainty on regression problems, in J.Quiñonero-Candela et al.(Eds), Lecture Notes on Artificial Intelligence (LNAI) 3944, pp.78-94, 平成 18 年 10 月 . . . . .	64
(2-9) S.Kurogi, D.Kuwahara, S.Tanaka, Ensemble of competitive associative nets and a method to select an effective number of units, LNCS 4232, 13th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.698-707, 平成 18 年 10 月 . . . . .	81
(2-10) S.Kurogi, S.Kuwahara, H.Tomisaki, T.Nishida, M.Mimata, K.Itoh, Ensemble of competitive associative nets for stable learning performance in temperature control of RCA cleaning solutions, NCS 4234, 13th International Conference on Neural Information Processing Proceedings, pp.563-571, 平成 18 年 10 月 . . . . .	91
(2-11) N.Nedachi, S.Kurogi, Reproduction and recognition of vowels using competitive associative nets, SICE ICASE International Joint Conference, pp.1147-1151, 平成 18 年 10 月 . . . . .	100

(2-12) S.Kurogi, S.Tanaka, R.Koyama, Combining the predictions of a time series and the first-order difference using bagging of competitive associative nets, Proceedings of the European Symposium on Time Series Prediction 2007, pp.123-131, 平成19年2月 . . . . .	123
(1-2) Shuichi Kurogi, Miho Sawa, Takamasa Ueno, Time series prediction of the CATS benchmark using Fourier bandpass filters and competitive associative nets, Neurocomputing (平成19年3月 accepted) .	114
(1-3) 黒木秀一, 西田健, 競合連想ネットによる距離画像からの平面抽出, 日本神経回路学会誌 (発表予定) . . . . .	123
(2-13) S.Kurogi, R.Koyama, S.Tanaka, T.Sanuki, Forecasting Using First-Order Difference of Time Series and Bagging of Competitive Associative Nets, 20th International Joint Conference on Neural Networks (発表予定), 平成19年7月 . . . . .	130
(2-14) T.Nishida, S.Kurogi, Y.Takemura, H.Fukumoto, S.Okada, Range Data Approximation for Mobile Robot by Using CAN2, 20th International Joint Conference on Neural Networks (発表予定), 平成19年7月 . . . . .	136
(2-15) S.Kurogi, N.Nedachi, Y.Funatsu, Reproduction and Recognition of Vowel Signals Using Single and Bagging Competitive Associative Nets, International Conference on Neural Information Processing (発表予定), 平成19年11月 . . . . .	141

## 2 研究目的

競合連想ネットは当該研究者等が開発研究してきたニューラルネットであり、非線形関数を学習して区分的線形関数として近似する能力をもつ。関数近似に用いられる従来の代表的なニューラルネットとしてはBPN(back-propagation net), RBFN(radial basis function net), SVR(support vector regression)などがあるが、それらは非線形連続な入出力関数を実現するネット構造をもち逐次的な非線形最適化法である勾配法や2次元最適化法などに基づく学習法を用いるが、競合連想ネットはそれらとは異なるネットワーク構造と学習法、すなわち区分的線形関数を実現する競合連想ネット構造および競合学習(勾配法)と連想記憶(線形最小二乗法)を融合した学習法を採用している。本ネットの有効性や性能の高さは関数近似、降水量推定、非線形時変プラントの制御などで示されている。例えば制御への応用においては、非線形時変系の複数の動作点における線形モデル(線形の入出力関係)をひとつのネットで学習し、各時刻でひとつのモデルを選択して関数近似するので、一般化予測制御などの従来の効率の良い線形制御法が直接利用できるという点で他のネットに無い有効性を持っている。また関数近似の性能の高さは2000年度電子情報通信学会総合大会シンポジウム・降水量推定コンテストにおいて第2位の成績を得たことから示されるが、さらに種々のベンチマーク関数に対して、BPN, RBFN および SVR よりも優れた近似性能を示すことも確かめている(2003年電子情報通信学会論文誌, pp.184-194参照)。本研究ではこの競合連想ネットを以下のように変形し、その応用を行うことを目的とした。

- (1) 競合連想ネットの逐次的学習法の変形とその検討：当該研究者等は本研究着手時点までに競合連想ネットを構成するユニット数が非常に多い場合の学習の最適性(漸近最適性という)に基づく逐次学習法を構築しその有効性を確かめていた。しかしこの学習法は訓練データが無数個の要素をもつ母集団からある確率分布に従って一個ずつ逐次的に与えられる状況を想定しているのに対し、実際の応用面では訓練データを生成する系(母集団または確率分布)が時変の場合があったり、利用できる訓練データが有限個しかない場合などがある。本研究ではこのように実際の応用場面を想定して各場面に有効な諸変形をできるだけ統合した枠組で理論的に検討することにより、より見通しの良い競合連想ネットの変形や改良を行う。
- (2) 非線形時変プラントの制御への応用：半導体の製造プロセスにおけるシリコンウエハ洗浄の代表的手法であるRCA洗浄法においては、硫酸と過酸化水素水の混合液等の温度制御を行う必要があるが、これらの混合液は非線形時変の発熱化学反応を生じるため従来の制御手法の適用がかなり困難であった。これまで当該研究者等が開発した逐次学習法を用いる競合連想ネットでも要求仕様を満たす制御性能を得ているが、さらに性能を高めたいという要求があり、上記(1)で改良した競合連想ネットを適用してその制御性能を向上

させる。

- (3) 音声時系列の解析と認識への応用：母音や単語音声などの時系列はAR(自己回帰)モデルなどの線形予測手法を用いて解析し認識(構造同定)する手法がほぼ確立されている一方、母音時系列が非線形カオスの挙動を示すことも最近明らかになってきている。さらに当該研究者等の研究によると、競合連想ネットにより獲得された母音時系列の区分的線形モデルは非線形の有声音発生源と線形の調音部分(線形ARモデル)を結合した非線形ARモデルとして捉えることができ、実際の母音時系列を線形ARモデルよりも精度良く再現することができた。これは母音は従来のパルス発生源と線形ARモデルを結合したモデルよりも非線形ARモデルとしてモデル化した法が良いことを示している。本研究ではこの非線形ARモデルから調音部分を表わす線形ARモデルを抽出して母音や単語音声の認識に応用し、認識性能を向上させる。

競合連想ネットは当該研究者等が開発してきた独創的なネットであり、このネットの非線形関数を区分的に線形近似する機能は、種々の応用分野で開発されてきた線形手法を有効利用しながら、非線形問題を扱う手法を与えることができる。競合連想ネットの性能は上述のようにこれまでの逐次学習法でもかなり高いことが示されているが、上記課題(1)は実際の応用面において現れる比較的一般的な諸制約に適した逐次学習法の変形を理論的に検討して性能向上を計るものであり、課題(2)では特に実様面での性能向上、課題(3)では音声認識における新しい理論展開と性能向上、が期待でき、その意義は大きい。

区分的な線形近似という意味で競合連想ネットに類似した手法としては、カオス時系列予測法として開発された局所線形近似法やポロノイ分割法(合原編：カオス時系列解析の基礎と応用、産業図書、2000年参照)などがあるが、それらは競合連想ネットのような二乗平均誤差の最小化に基づく区分領域の学習などは行わない。この学習の有用性は与えられた信号を再現するための効率的な記憶を形成できること、および形成された記憶をもちいて信号源の線形性や非線形性の解析を行えることなどにある。これまで国内外で競合連想ネットの研究は当該研究者等以外は行っておらず、また課題(2)や(3)の非線形問題への区分的線形関数の学習と近似という見地からのアプローチも本研究以外には見当たらない。

以上のよに本研究は特色ある研究であり、非線形問題の解析や応用の研究が格段に発展することが期待できる。

## 3 研究成果

前節で示した本研究の目的は以下のように達成された。

### 3.1 競合連想ネットの逐次的学習法の変形とその検討

現実の問題に即した手法として次の3つの変形手法を構築することができた。

#### 3.1.1 バッチ学習法

利用できる訓練データが有限個しかない場合、訓練データのすべての情報を用いて一括して学習するバッチ学習法の枠組は、訓練データを一個ずつ学習するオンライン学習法(または逐次的学習法)の枠組よりも、より高性能な学習結果が期待できる。この見地から、従来のCAN2のオンライン学習法を変形したバッチ学習法を構成し、いくつかの問題に適用した。特に IJCNN2004 (International Joint Conference on Neural Networks) の時系列予測コンペティションで第3位、NIPS2004 (Neural Information Processing) の Evaluating Predictive Uncertainty Challenge の回帰部門で第1位 (regression winner)、および ESTSP2007 (European Symposium on Time Series Prediction) では第2位の成績を得ることができた。これらの結果は本研究で開発した学習法の性能が国際的レベルからみても非常に高いレベルにあることを示している。この研究成果に関する発表文献は、(1-1), (1-2), (2-1), (2-2), (2-3), (2-4), (2-5), (2-6), (2-7), (2-8), (2-9), (2-10), (2-12), (2-13), (3-1) である。

#### 3.1.2 アンサンブル学習とバギング学習法

上記のCAN2のバッチ学習法は訓練データに対する誤差(訓練誤差, 学習誤差または経験誤差ともいう)を最小化するように構成したものであるが、未知の(テスト)データに対する誤差(汎化誤差または予測誤差ともいう)を安定して小さくすることが望まれることが多い。このための手法として、(1) ユニット数の異なるCAN2を複数用いた予測の平均をとる手法(アンサンブル学習法)、および(2) ブートストラップ法により生成した異なる訓練データ集合を学習させたCAN2の予測の平均をとる手法(バギング学習法)を提案し、いくつかの問題に応用した。特に、上記のESTSP2007では上記のバッチ学習法とこのバギング学習法を用いた結果、第2位の成績を得た。この研究成果に関する発表文献は、(2-8), (2-9), (2-10), (2-12), (2-13) である。

### 3.1.3 時系列差分を用いる学習法

時系列の解析, 制御, 予測などの処理を行うために時系列の学習を行う場合, 訓練時系列の周期性を学習して獲得するだけでなく, 単調増加や単調減少などの非周期的な性質も獲得する必要がある. しかし, 与えられた訓練時系列が非周期的時系列に周期的時系列が重畳しているような場合の時系列の学習獲得は, 与えられた時系列をそのまま学習するだけでは困難である. そこで時系列差分を用いて, 非周期的な成分を除いて周期的な成分の学習獲得を行い, その予測結果から元の時系列の予測を再構成する手法を開発した. ここで, 時系列差分を用いると周期性の学習獲得はできるが, 時系列のトレンド (大まかな増減) の学習結果はノイズの影響を大きく受けることになる. そこで時系列差分を用いて周期性を学習するとともに, 時系列のトレンドを補正する手法を開発した. この研究成果に関する発表文献は (2-12), (2-13) であるが, この他, 2007 年九州工業大学大学院修士論文「バギングを適用したバッチ型 CAN2 と時系列差分を用いたモデル切替型予測制御-RCA 洗浄液の温度制御への適用」(桑原 大介著) でも発表している.

### 3.2 非線形時変プラントの制御への応用

非線形時変プラントとして, RCA 洗浄における洗浄液の温度制御について上記の学習法, すなわち, バッチ学習法, バギング法, および時系列差分を用いる手法を適用し, その性能を向上させることができた. この研究性化に関する発表文献は, (2-1), (2-5), (2-10) であり, この他, この他, 2007 年九州工業大学大学院修士論文「バギングを適用したバッチ型 CAN2 と時系列差分を用いたモデル切替型予測制御-RCA 洗浄液の温度制御への適用」(桑原 大介著) で発表している.

### 3.3 音声時系列の解析と認識への応用

上記学習法を, 母音時系列の再現と認識, および時系列予測問題へ応用することにより, 性能向上を行うことができることを確認した. 特にバギング学習法を用いることにより, 母音時系列の再現の安定性と認識率の向上を行うことができた. この研究成果に関する発表文献は, (2-3), (2-11), (2-12), (2-13), (2-15) である.

### 3.4 距離画像処理への応用

レーザレンジファインダ (LRF) から得られる距離画像処理に CAN2 の区分的線形近似能力とその学習能力を応用する研究を行った. LRF により得られる距離画像は, 環境光に影響されず高速かつ高精度に計測データが得られる半面, (1) ブラックスポットと呼ばれるデータ欠落点を含むことがある, (2) 計測距離の分解能 (約 10mm) による量子化誤差を含む, (3) 計測角度の分解能が高く (約  $0.25^\circ$ ), 一枚の

距離画像のデータ量がかなり大きくなる，などの問題点をもつ．これらの問題点を CAN2 を用いて解決する研究を行い，距離画像に適したデータ補間法を提案するとともに，雑音除去，データ圧縮，距離画像からの床，壁などの平面抽出などに応用した．この研究成果に関する発表文献は，(2-6)と(2-14)である．

## 4 研究のまとめと今後の展望

本研究で構築した競合連想ネット CAN2 のためのバッチ学習法, バギング学習法および時系列差分を用いる時系列学習法の性能の高さは, 国際的な種々のコンペティションを通して示すことができた. これらの学習法の性能の高さは, (1) 区分的線形近似を行う競合連想ネットの構造そのもの, (2) 基礎となる逐次的 (オンライン) 学習法の性能の高さ, (3) 従来のバッチ学習法とバギング学習法の CAN2 への適切な適用, に基づいていると考える. すなわち, (1) と (2) については, 競合連想ネットが非線形関数を区分的線形近似を学習するための基本的な逐次的学習法の原理として, (i) 勾配法に基づく競合学習により入力空間を区分し, (ii) 再帰的最小二乗法に基づく連想学習により各領域での線形近似を最適化し, さらに (iii) 漸近最適条件を用いて勾配法の局所解問題に対処する, という3つの手法を吟味検討して採用しており, 本研究の変形学習法もこの原理を踏襲して変形したことに, 本研究の良好な成果を得る基盤があったと考える. また本研究と平行して, 他のニューラルネットを用いたバギング学習やベイズ学習などの統計的学習法の研究が国際的に盛んに行われ, それらの長所や欠点などの諸性質が解明されてきたことも, 本研究の一助となっている.

CAN2 の統計的学習法については改良や変形の余地がまだ数多くあり, 今後も種々の応用を検討しつつ本研究を進展させる開発研究を続けていく計画である.

## 5 謝辞

本研究の中で、特に RCA 洗浄液の制御法に関しては、小松エレクトロニクス(株)の多大な協力と援助があり感謝しています。特に伊藤勝美氏および三股充氏には研究協力者として援助して頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

また九州工業大学工学部黒木研究室の学生諸氏にも多大に協力して頂きました。特に瀧川康裕君、上野貴雅君、荒木緑広君、沢美穂君、江口絢子君、境祐輔君、富崎広章君、田中信也君、桑原大介君、根立奈緒子君には、アルゴリズム開発、プログラム作成、評価実験と考察等の多大な協力を頂きました。ここに感謝します。

## 6 研究発表論文

以下，本研究に関する発表論文の写しを発表年月順に掲載する。