

Deep learning

深層学習

人工知能学会 監修

神鷹敏弘 編

麻生英樹・安田宗樹・前田新一・岡野原大輔

岡谷貴之・久保陽太郎・ボレガラ ダヌシカ 共著

近代科学社

Deep Learning

深層学習

人工知能学会 監修

神鷹敏弘 編

麻生英樹・安田宗樹・前田新一・岡野原大輔

岡谷貴之・久保陽太郎・ボレガラ ダヌシカ 共著

近代科学社

◆ 読者の皆さまへ ◆

平素より、小社の出版物をご愛読くださりまして、まことに有り難うございます。
(株)近代科学社は1959年の創立以来、微力ながら出版の立場から科学・工学の発展に寄与すべく尽力してきております。それも、ひとえに皆さまの温かいご支援があったものと存じ、ここに衷心より御礼申し上げます。

なお、小社では、全出版物に対してHCD（人間中心設計）のコンセプトに基づき、そのユーザビリティを追求しております。本書を通じまして何かお気づきの事柄がございましたら、ぜひ以下の「お問合せ先」までご一報くださいますよう、お願いいたします。

お問合せ先：reader@kindaikagaku.co.jp

なお、本書の制作には、以下が各プロセスに関与いたしました：

- ・企画：小山 透
- ・編集：高山哲司
- ・組版：藤原印刷 (L^AT_EX)
- ・印刷：藤原印刷
- ・製本：藤原印刷 (PUR)
- ・資材管理：藤原印刷
- ・カバー・表紙デザイン：川崎デザイン
- ・広報宣伝・営業：富高琢磨，山口幸治

●本書に記載されている会社名・製品名等は、一般に各社の登録商標または商標です。本文中の©、®、TM等の表示は省略しています。

- ・本書の複製権・翻訳権・譲渡権は株式会社近代科学社が保有します。
- ・**JCOPY** ((社)出版者著作権管理機構 委託出版物)
本書の無断複写は著作権法上での例外を除き禁じられています。
複写される場合は、そのつど事前に(社)出版者著作権管理機構
(電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp) の
許諾を得てください。

序 文

深層学習 (deep learning) は、ここ数年、機械学習 (あるいは人工知能) の分野で大きな注目を集めている技術である。「深層」というのは、学習を行うニューラルネットワーク (ないしはそれに相当するもの) において層が深い、すなわち、何段にも層が積み重なっているということであり、深層学習とは多段の層を持つ機構を用いた学習のことである。深層ニューラルネットワークを構築することは、長い間、研究領域におけるある種の「夢」であった。というのも、人間の脳は、多段に積み重なった構造をしているにもかかわらず、それと同じような構造を模擬するだけでは、肝心の学習の能力がうまく発揮されないということがあったためである。

そして、この「深層」であるということは、機械学習を適用する際の「問題の表現」において極めて重要である。表現というのは、与えられたデータないしは外界のどこに注目し特徴量として表すかということであるが、これまでそれを決めるのは人間の能力に頼るほかなかった。機械が特徴量を自動的に抽出できる、すなわち表現を学習することができれば、それは画期的なことである。深層学習は、表現学習を実現する一つの有望な方法であり、人工知能の分野全体にとっての潜在的な意義も大きい。

本書は、人工知能学会の『人工知能』誌に2013年5月号から2014年7月号の間に計7回にわたって連載した連載解説「Deep Learning (深層学習)」に加筆と再編を行ったものである。本書でも各章ごとに完結しており、個別に読み進めることができる。深層学習に関わる研究領域の第一線で活躍している研究者が執筆している。もともと人工知能学会の会員を対象にしたものであるが、各章ともにわかりやすく書かれており、情報系の大学院生レベルであれば、理解することができる内容であろう。また、詳しい数式は追わず、その意味するところを把握するだけであれば、技術系の幅広い読者にとって十分に役立つで

あろう。そういった方には、まず全体像を把握した後、必要な箇所を、参考文献とあわせ深く理解していくことをお勧めする。

各章は以下のように構成されている。第 I 部は第 1 章から第 4 章までで構成され、基礎的な内容および実装面における内容である。

第 1 章は麻生英樹による深層学習全体の位置づけや歴史的な経緯であり、深層学習を俯瞰的に理解するのに適している。なぜ深層か、なぜ表現かという基本的な問いから始まり、幅広い視野からややもすれば過度な期待とともに語られる深層学習を客観的に解説している。冷静さと期待感を同時に含んだ、極めて正しい論が展開されており、深層学習の俯瞰的な解説として秀逸である。

第 2 章は安田宗樹による解説であり、深層学習における一つの大きな理論的モデルの柱であるボルツマンマシンに関して述べられている。ボルツマンマシンのモデルや学習といった基礎からはじまって、深層学習でよく用いられる制限ボルツマンマシンと話が進み、深層ボルツマンマシンが導入される。自己符号化器とあわせて事前学習の意味についても議論されている。

第 3 章では、前田新一により、制限ボルツマンマシンの学習に用いられるコントラストティブ・ダイバージェンス法 (CD 法) について解説されている。CD 法の根本となる考え方、事前学習の意味や位置づけからはじまり、深層学習における CD 法について詳しく述べられている。

第 4 章は、大規模な実装という観点からの岡野原大輔による解説であり、世界各国で開発競争が行われている核心部分について触れられている。GPU の活用や並列化・分散化といったテーマについて、最新のアプローチが紹介されている。実装時のチェックポイントや超パラメータの最適化といった話題も価値が高い情報であろう。

次に、第 II 部では、深層学習の応用に焦点をあて、画像、音声、および自然言語と、それぞれ具体的な分野に関して解説されている。

第 5 章では、岡谷貴之による画像認識の解説であり、深層学習でも最もスポットライトを浴びる研究テーマである。画像認識で高い精度を出している畳み込みニューラルネットワークのモデルと具体例について述べた後、深層学習が注目されている要因である、教師なし学習による画像特徴の抽出について説明されている。両者の位置づけについての示唆に富んだ解説が展開される。

第6章は、画像認識と並んで、深層学習のハイライトの一つである音声認識について、久保陽太郎が解説する。画像認識との大きな違いは時系列の扱いであり、時系列を扱うためのモデルが導入され、それを深層にするための方法や事前学習について述べられている。音響モデルと同時に言語モデルについても、最新の手法も含め、解説されている。

第7章は、ボレガラ ダヌシカによる自然言語処理分野における解説である。自然言語処理の分野は、深層学習にとっては手強い分野である。単語や文をいかに表現するかにさまざまな工夫が行われており、その中でも基本的なニューラル言語モデル、単語の分散表現などからはじまり、近年注目を集めているword2vecについての解説も含まれている。

どの章を読んでも印象的なのが、深層学習はまだはじまったばかりのものであり、理論的にも不十分な点、解明されていない点が多いということである。これは裏を返せば、研究の余地や発展の余地が多分にあるということである。それぞれの解説者が不十分な点が多々あることを認めながらも、その可能性に期待している。深層学習は、今後、機械学習あるいは人工知能の分野において、注目すべき重要な技術であろう。そして、その技術的な可能性を無条件に期待することなく、あるいは、過去の失敗を理由に無条件に卑下することなく、正しく見極めることが大切である。本書がその一助になれば幸いである。

最後に、本書の内容について貴重な意見を下さった以下の方々へ感謝したい：海野裕也，大塚 誠，大野健太，小林颯介，坪井祐太，中山英樹，福島邦彦，渡辺太郎，渡部晋治。

2015年9月
松尾 豊
松原 仁

執筆者一覧

第1章 麻生 英樹

第2章 安田 宗樹

第3章 前田 新一

第4章 岡野原 大輔

第5章 岡谷 貴之

第6章 久保 陽太郎

第7章 ボレガラ ダヌシカ

編集 神鳶 敏弘

目次

序文	i
数式の表記	xi
深層学習手法の全体像	xiii
第I部 基礎編	1
第1章 階層型ニューラルネットワークによる深層学習	3
1.1 はじめに	3
1.2 内部表現のデータからの学習	5
1.2.1 内部表現の重要性とその学習法	5
1.2.2 特徴工学と表現学習	7
1.3 階層型ニューラルネットワーク	8
1.3.1 ニューラルネットワーク研究の系譜	9
1.3.2 階層型ニューラルネットワークの数理モデル	9
1.4 階層型ニューラルネットワークの学習	12
1.4.1 誤り訂正学習	12
1.4.2 誤差逆伝播学習	14
1.4.3 競合学習	15
1.5 深層ニューラルネットワークによる深層表現の学習	16
1.5.1 誤差逆伝播学習による内部表現の学習	16
1.5.2 深層ニューラルネットワークの学習	17
1.6 畳み込みニューラルネットワーク	19
1.7 自己符号化器	22
1.7.1 自己符号化器とその学習	22
1.7.2 積層自己符号化器	23

1.7.3	スパース自己符号化器	24
1.7.4	雑音除去自己符号化器	25
1.8	おわりに	25
	参考文献	27
第2章	深層ボルツマンマシン	31
2.1	はじめに	31
2.2	統計的機械学習の考え方——データ生成モデルの再現	32
2.3	マルコフ確率場とボルツマンマシン	35
2.3.1	マルコフ確率場	35
2.3.2	ボルツマンマシン	37
2.3.3	ボルツマンマシンとホップフィールド・ネットワーク の関係	39
2.3.4	ボルツマンマシンの学習へ	40
2.4	可視変数のみのボルツマンマシン学習	40
2.4.1	カルバック-ライブラー・ダイバージェンスからの学 習方程式の導出	43
2.4.2	ボルツマンマシン学習の実装と組み合わせ爆発の問題	44
2.5	隠れ変数ありのボルツマンマシン学習	46
2.5.1	隠れ変数ありの場合の学習について	49
2.5.2	隠れ変数を導入する意味	50
2.6	ボルツマンマシン上での近似手法	52
2.6.1	ギブスサンプリング	52
2.6.2	平均場近似	55
2.7	制限ボルツマンマシン	57
2.7.1	条件付き独立性に基づく制限ボルツマンマシンの性質	59
2.7.2	制限ボルツマンマシンの学習	60
2.8	深層ボルツマンマシン	62
2.8.1	深層ボルツマンマシンの事前学習	64
2.8.2	事前学習後の最尤推定法に基づく学習	67
2.8.3	自己符号化器としての制限ボルツマンマシン	70
2.8.4	深層ボルツマンマシンの利用法	71
2.9	深層信念ネットワーク	72
2.9.1	深層信念ネットワークに対する事前学習と推論	74

	2.9.2 深層信念ネットワークに対する事前学習の正当性 . . .	75
2.10	おわりに	80
	参考文献	80
第3章	事前学習とその周辺	83
3.1	はじめに	83
3.2	自由度の高い統計モデルの学習における困難とその解決法	84
	3.2.1 学習を難しくする要因	84
	3.2.2 既存の解決法	85
	3.2.3 新たな解決法	88
3.3	自己符号化器による内部表現の学習	91
	3.3.1 自己符号化器とその損失関数の定義	91
	3.3.2 層ごとの貪欲学習を用いた自己符号化器の事前学習	93
3.4	確率的なモデルを用いた事前学習	93
	3.4.1 制限ボルツマンマシン	94
	3.4.2 指数型ハーモニウム族	96
	3.4.3 指数型ハーモニウム族のコントラストティブ・ダイバ ージェンス法による学習	100
	3.4.4 コントラストティブ・ダイバージェンス法が最適化して いる損失関数	100
	3.4.5 コントラストティブ・ダイバージェンス法と類似した学 習則を与えるアルゴリズム	107
	3.4.6 コントラストティブ・ダイバージェンス法から派生した 学習則	109
	3.4.7 確率的なモデルの事前学習と自己符号化器の学習の関係	111
3.5	確定的なモデルを用いた事前学習	112
	3.5.1 教師なし学習による確定的なモデルの学習	113
	3.5.2 教師あり学習による確定的なモデルの学習	117
3.6	Product of Experts の学習法としてのコントラストティブ・ ダイバージェンス法	118
3.7	おわりに	119
	参考文献	120

第 4 章	大規模深層学習の実現技術	125
4.1	はじめに	125
4.2	深層学習の最適化	126
4.2.1	深層学習の基本計算	127
4.2.2	確率的勾配降下法	128
4.3	高速化手法	129
4.3.1	分散並列処理：DistBelief	130
4.3.2	GPU を用いた大規模ニューラルネットの実現	133
4.3.3	InfiniBand の利用	135
4.3.4	学習収束の高速化	136
4.4	過学習制御：DropOut	139
4.5	活性化関数	142
4.5.1	ReLU	143
4.5.2	MaxOut	143
4.6	学習率の調整	144
4.6.1	AdaGrad	144
4.6.2	Adam	145
4.6.3	超パラメータの最適化	146
4.7	実装技術	147
4.7.1	実装の正しさのチェック	147
4.8	おわりに	148
	参考文献	148
第 II 部	応用編	151
第 5 章	画像認識のための深層学習	153
5.1	はじめに	153
5.1.1	畳み込みニューラルネットワークの再発見	154
5.1.2	その後の研究	154
5.2	畳み込みニューラルネットワーク	156
5.2.1	基本構造	156
5.2.2	畳み込み層	157
5.2.3	プーリング層	160

5.2.4	例：手書き数字認識のための畳み込みニューラルネット	161
5.2.5	学習	163
5.2.6	コントラスト調整とデータの正規化	164
5.3	畳み込みニューラルネットワークのはたらき	166
5.3.1	一般物体認識の難しさ	166
5.3.2	一般物体認識の従来法	167
5.3.3	従来法と畳み込みニューラルネットワークの比較	170
5.3.4	ネットワークの構造と認識性能	173
5.3.5	畳み込みニューラルネットワークの拡張の試み	174
5.4	畳み込みニューラルネットワークの内部表現	175
5.4.1	可視化	175
5.4.2	脳神経系との関係	176
5.4.3	転移学習	176
5.5	画像特徴の教師なし学習	178
5.5.1	単層自己符号化器による局所特徴の学習	178
5.5.2	多層ネットワークによる特徴学習	181
5.6	おわりに	184
	参考文献	185
第6章	音声認識のための深層学習	189
6.1	はじめに	189
6.2	音声認識	190
6.2.1	音声認識に用いられるモデル	191
6.2.2	大語彙連続音声認識システムの構成	194
6.3	音声認識におけるニューラルネットワーク	195
6.3.1	時間遅れニューラルネットワーク	197
6.3.2	隠れマルコフモデルと組み合わせたニューラルネット： ハイブリッド方式	198
6.3.3	隠れマルコフモデルと組み合わせたニューラルネット： タンデム方式	200
6.4	音響モデルにおける深層学習：事前学習	201
6.4.1	制限ボルツマンマシンによる事前学習を用いた深層 ニューラルネットワーク-隠れマルコフモデル	202
6.4.2	雑音除去自己符号化器による事前学習	204

6.4.3	識別的事前学習	205
6.5	音響モデルにおける深層学習：学習とモデルの進展	206
6.5.1	系列識別学習	207
6.5.2	回帰結合ニューラルネットワークによる音響モデル	211
6.5.3	Long Short-Term Memory 法	214
6.5.4	マルチストリーム・マルチタスク学習	217
6.6	言語モデルにおける深層学習	218
6.6.1	回帰結合ニューラルネットワークによる言語モデル	218
6.7	おわりに	220
	参考文献	222
第7章	自然言語処理のための深層学習	225
7.1	はじめに	225
7.2	深層学習と言語モデル	228
7.2.1	ニューラルネットワーク言語モデル	229
7.2.2	その他の言語モデル	231
7.3	単語の意味表現学習	233
7.3.1	ボトムアップ的な意味表現構築手法	233
7.3.2	トップダウン的な意味表現予測手法	234
7.3.3	階層型ソフトマックスによる計算	239
7.3.4	意味表現学習手法のその他の話題	240
7.4	深層学習と意味構築	243
7.4.1	言い換え表現認識への応用	244
7.5	おわりに	248
	参考文献	249
	和文索引	253
	英文索引	261

数式の表記

本書で用いる表記をここにまとめておく。

変数や行列

大小文字・書体により、ベクトル・スカラーや、通常変数・実現値・確率変数・集合を次のように区別する。

大小文字・書体による変数の種類の区分

表記	内容
x	(小文字イタリック体) スカラー変数, スカラー実現値
X	(大文字イタリック体) スカラー確率変数
\mathbf{x}	(小文字ボールドローマン体) ベクトル変数, 確率変数のベクトル実現値
\mathbf{X}	(大文字ボールドローマン体) 行列変数, ベクトル確率変数
\mathcal{X}	(大文字カリグラフィック体) 集合変数

なお、確率変数が特定の実現値をとる場合の確率 $p(X = x)$ や $p(\mathbf{X} = \mathbf{x})$ は、特に混乱が生じない場合は $p(x)$ や $p(\mathbf{x})$ のように略記する。

下記の変数については、本書を通じて同じ内容を表すものとする。

変数の表す内容

変数	内容
$x, \mathbf{x}, \mathbf{X}$	入力信号・情報
$y, \mathbf{y}, \mathbf{Y}$	出力信号・情報
$w, \mathbf{w}, \mathbf{W}$	結合重み
$v, \mathbf{v}, \mathbf{V}$	可視変数 (観測変数)
$h, \mathbf{h}, \mathbf{H}$	隠れ変数 (潜在変数)
$\theta, \boldsymbol{\theta}, \Theta$	パラメータ
\mathbf{I}	単位行列
$\mathbb{R}, \mathbb{N}, \mathbb{Z}$	それぞれ実数, 自然数, 整数の集合
$\mathbf{0}$	$\mathbf{0}$ ベクトル (要素がすべて 0 であるベクトル)

演算と関数

本書を通じて用いる演算と関数の表記を以下にまとめておく。

演算と関数の共通表記

変数	内容
\mathbf{X}^T	行列 \mathbf{X} の転置
\mathbf{X}^{-1}	行列 \mathbf{X} の逆行列
$\mathbf{X} \circ \mathbf{Y}$	行列の要素ごとの積
$f * g$	畳み込み演算
$\text{Dom}(x)$	変数 x の定義域
$\text{diag}(\mathbf{d})$	ベクトル \mathbf{d} を対角要素とする対角行列
$H(p)$	確率分布 p のエントロピー関数： $-\sum p \log p$, $-\int p \log p$
$a(x)$	活性化関数：ニューラルネットワークのノード内で、重みと入力の内積を出力に変換する関数
$\text{sig}(x)$	シグモイド関数： $1/(1 + e^{-x})$

ベクトル引数の関数 スカラー関数 $f(x)$ に対して、その引数がベクトルである表記 $f(\mathbf{x})$ は、ベクトル \mathbf{x} の各要素を関数 f に適用して得られるベクトルを表す。

確率質量関数と確率密度関数 確率変数 X が離散の場合の確率質量関数も、連続値の場合の確率密度関数も特に区別することなく $p(X)$ と表記する。

期待値 $E_{p(X)}[f(X)]$ は、分布 $p(X)$ についての次の期待値を表す：

$$\begin{aligned} \sum_{x \in \text{Dom}(X)} f(x)p(x) & \quad \text{— } X \text{ が離散の場合} \\ \int_{x \in \text{Dom}(X)} f(x)p(x)dx & \quad \text{— } X \text{ が連続の場合} \end{aligned}$$

なお、 $p(X)$ を省略した場合は、関数 f のすべての確率変数の同時分布に関する期待値を表す。例えば、 $E[f(X, Y)]$ は、 $E_{p(X, Y)}[f(X, Y)]$ の意味である。

カルバック-ライブラーダイバージェンス 確率分布 $p(X)$ と $q(X)$ の間のカルバック-ライブラーダイバージェンスを次のように表記する：

$$D_{\text{KL}}(p(X) \parallel q(X)) = \int_{x \in \text{Dom}(X)} p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx$$

深層学習手法の全体像

本書では様々なニューラルネットワークのモデルを紹介するが、深層学習とそれ以外の手法という点と、確定的・確率的モデルかという二つの観点から、これらのモデルを関連づけてその全体像を示しておく。その後、確定的と確率的モデルに分けてそれぞれの手法について簡単に紹介する。

まず、カラーページ最初の『深層学習手法の全体像』の左側の確定的モデルでは、入力に対して確定的にその出力が決まる。これらのモデルは、結合重みとバイアスをパラメータとする線形変換と、この変換後の値を非線形変換する活性化関数で決まるノードで構成されていることが多い。図の右側にまとめたもう一方の確率的モデルは入出力変数の同時分布を表す。データ集合に含まれる入出力値からその値がわかる観測変数と、値がわからない隠れ変数があり、それらの変数間の依存関係をグラフィカルモデルという表現方法で記述している。確定的と確率的のどちらにも、2~3層の浅いのニューラルネットワークと、それ以上の層数で構成される深層ニューラルネットワークとがある。

なお、読者が深層学習の全体を概観するのに参考となるように各種のモデルを分類した図を示したが、この分類はあくまで、非深層・深層と、確定的・確率的モデルという特定の観点からの分類にすぎないことに留意されたい。例えば、確率的モデルの制限ボルツマンマシンは、確定的モデルの深層自己符号化器の事前学習に利用されている。このことから、ニューラルネットワークの各手法の関係は複雑であり、いろいろな分類が可能なことが想像できるだろう。

確定的モデル

確定的ニューラルネットワークの多くは階層型ニューラルネットワークと自己符号化器である。

階層型ニューラルネットワーク型

階層型ニューラルネットワークは、入力から出力へ結合を通じて信号が順伝播するフィードフォワード型の構造をしており、主に教師あり学習に用いられる。この種のニューラルネットワークは図の最も左にまとめてあり、これらを順に列挙する。

パーセプトロン【1.4.1 項】

2層でのみ構成される最初に提案されたニューラルネットワークであり、図では階層型ニューラルネットワークの一種である。線形分離可能と呼ばれる条件を満たす問題しか解けない制限があるが、解ける問題については誤り訂正学習則により有限回の更新で学習が収束することが証明されている。

階層型ニューラルネットワーク【1.3 節】

深層学習の登場前に最も使われていたのは、3層前後のフィードフォワード構造を備えた階層型ニューラルネットワークである。このモデルは、多層パーセプトロンとも呼ばれ、誤差逆伝播学習という効率的な学習法が開発されたことにより1980年代に普及した。教師あり学習に用いる場合がほとんどだが、競合学習則を適用して教師なし学習に用いる場合もある。

深層（階層型）ニューラルネットワーク【1.5 節】

深層ニューラルネットワークは、広義には多層のニューラルネットワーク全般のことを指し、狭義にはフィードフォワード構造の階層型ニューラルネットワークを4層以上に拡張したものを指す。この狭義のニューラルネットワークは、3層でも中間層のノード数が十分であれば任意の関数を近似できるという理論的利点を備えていたが、局所最適解や勾配消失問題などの技術的問題のため、広く使われることはなかった。しかし、中間ノード数を増加させるより、深層化のほうが効果的に予測性能を向上できることが発見的に示されたことに加えて、事前学習やDropOutなどの新技術の登場や、活性化関数やネットワーク構造などの工夫により技術的問題に対処できるようになったことから2010年代に普及した。

再帰ニューラルネットワーク【7.4.1 項】

再帰的部分構造を組み込んだニューラルネットワークであり、再帰的な構造を備えた内部表現を獲得する目的で用いる。下位の部分木構造から、上位の部分木構造を再帰的に構成する木構造になっているため、再帰ニューラルネットワークと呼ばれている。図では階層型ニューラルネットワークに含めているが、本書では教師なし学習を行う自己符号化器に再帰的構造を組み込んだ再帰自己

符号化器を取り上げる。

畳み込みニューラルネット【5.2 節】

畳み込み構造を組み込んだ階層型ニューラルネットワークである。深層学習の登場以前からネオコグニロンや LeNet などとして提案されていた。2010 年代の分散並列計算技術の進展と、学習用データの大規模化により、画像認識の分野で特に普及している。

回帰結合ニューラルネット【6.5.2 項】

回帰結合ニューラルネットは、系列データを処理する目的で考案された。そのために、前回の時刻の入力の情報を、現在の入力の処理に伝えるための回帰結合入力を備えている。畳み込みニューラルネットと同様に、深層学習の登場以前から提案されていたが、2010 年代に学習の大規模化に伴って、音声認識や自然言語処理分野で普及している。勾配消失問題に対処した long short-term memory 法などの改良もなされている。

自己符号化器型

もう一方の確定的モデルである自己符号化器は、砂時計型のニューラルネットワークであり、教師なし学習を行う。自己符号化器は図の中央にまとめてあり、これらを順に列挙する。

自己符号化器【3.3.1 項, 1.7 節】

基本型の自己符号化器は、教師なし学習により入力の低次元表現を獲得する目的で考案された。入力を中間層で低次元表現に変換する符号化と、この低次元表現を元の次元の表現に戻す復号化とを組み合わせ、3 層の砂時計型の構造をしている。入力信号と出力信号の間の再構成誤差を小さくするように学習を行う。

深層自己符号化器【3.3.1 項】

深層自己符号化器は、入力から中間層までの符号化部分と、中間層から出力層までの復号化部分の層数を増やして深層化した自己符号化器である。

積層自己符号化器【1.7.2 項】

積層自己符号化器は、層ごとの貪欲学習により深層自己符号化器の勾配消失問題を回避したものである。

雑音除去自己符号化器【3.5.1 項, 6.4.2 項】

雑音除去自己符号化器は、入力信号に雑音を加えることで、未知の信号に対するロバスト性を向上させる手法である。

確率的モデル

ニューラルネットワークの分野で現在広く使われている確率モデルはボルツマンマシンに由来するものである。図の右端にまとめたこれらのモデルを順に紹介する。

ボルツマンマシン [2.3 節]

ボルツマンマシンは、マルコフ確率場という確率モデルの一種である。観測・隠れ変数を各ノードとし、これらのノード間の依存関係を無向の結合で示したグラフィカルモデルで記述する。組み合わせ爆発問題により学習が困難なため、あまり利用されていない。

制限ボルツマンマシン [2.7 節, 3.4.1 項]

制限ボルツマンマシンは、ボルツマンマシンに、観測変数と隠れ変数の間にしか依存関係がないように制限を加えた確率モデルである。この制限で格段に学習が効率化され、実用的な問題に適用されるようになった。ハーモニウムという名称で提案されたが、現在では制限ボルツマンマシンの呼称が定着している。観測変数と隠れ変数をそれぞれ1層と見なすと、全体で2層で構成されている。このモデルを指数族に一般化したものを指数型ハーモニウム族と呼ぶ。

深層ボルツマンマシン [2.8 節]

深層ボルツマンマシンは、制限ボルツマンマシンの隠れ変数の層をそのまま多段にすることで深層化したモデルである。事前学習やコントラストティブ・ダイバージェンス法などの手法の開発が進み、2010年代に広く利用されるようになった。

深層信念ネットワーク [2.9 節]

深層信念ネットワークは、隠れ変数を多層にして深層化する点では深層ボルツマンマシンと同じだが、その依存関係を無向の結合ではなく、有向の結合によって表現したものが深層信念ネットワークである。事前学習などの技術が活用でき、2010年代に普及が進んでいる。

和文索引

【記号・英数字】

1-of- n 表現 (1-of- n representation) 133, 163, 229
Adagrad 144
Adam 145
ASO 交差構造最適化
backpropagation through time 法 128, 212
bag-of-features モデル (bag-of-features model) 169
bag-of-words モデル (bag-of-words model) 226, 236
bag-of-visual-words モデル 交差構造最適化
モデル
BM ボルツマンマシン
BoF モデル 交差構造最適化
BoW モデル 交差構造最適化
BPTT 法 逆伝搬法
CDBN 畳み込み深層信念ネットワーク
CD 法 コントラストティブ・ダイバージェンス法
CNN 畳み込みニューラルネットワーク
ConvNet 畳み込みニューラルネットワーク
DAE 深層自己符号化器
DBL 法 detailed balance learning 法
DBM 深層ボルツマンマシン
DBN 深層信念ネットワーク
detailed balance learning 法 (detailed balance learning method) 104
DistBelief 130
DNN 深層ニューラルネットワーク
DNN-HMM 深層ニューラルネットワーク-隠れマルコフモデル
Downpour SGD 131
DropOut 139

EFH 指数型ハーモニウム族
ELM 極端学習機械
FA 因子分析
GMM 混合正規分布
GPU 133
HMM 隠れマルコフモデル
HNN 階層型ニューラルネットワーク
ICA 独立成分分析
ILSVRC 153
InfiniBand 135
KL 距離 (KL distance) カルバック-ライブラー・ダイバージェンス
KL 情報量 (KL information) カルバック-ライブラー・ダイバージェンス
KL ダイバージェンス (KL divergence) カルバック-ライブラー・ダイバージェンス
L-BFGS 法 (L-BFGS method) 131, 246
 L_1 正則化 (L_1 regularization) 25
lasso L_1 正則化
LCA 局所コントラスト正規化
LeNet 畳み込みニューラルネットワーク
limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno 法 L-BFGS 法
long short-term memory 法 214
low effective dimension 146
 L_p プーリング (L_p pooling) 160
LSTM 法 long short-term memory 法
MAP 推定 (MAP estimation) 最大事後確率推定
MaxOut 143
MFCC メル周波数ケプストラム係数
MLE 最尤推定
MMI 規準 (MMI criterion) 最大相互情報量規準

- MPF 法 ④ 最小確率流法
- MRF ④ マルコフ確率場
- MV-RNN ④ matrix vector recursive neural network
- NLMM ④ ニューラルネットワーク言語モデル
- NN ④ ニューラルネットワーク
- NN-HMM ④ ニューラルネットワーク-隠れマルコフモデル
- n* グラム (*n*-gram) 194, 226, 228
- PCA ④ 主成分分析
- PoE ④ product of experts
- product of experts 118
- pyramid match kernel 170
- RBM ④ 制限ボルツマンマシン
- rectified linear unit ④ ReLU
- ReLU 143, 156
- RNN ④ 回帰結合ニューラルネットワーク
- Sandblaster L-BFGS 131
- scale invariant feature transform ④ SIFT
- SGD ④ 確率的勾配降下法
- SIFT 168
- TDNN ④ 時間遅れニューラルネットワーク
- TICA ④ トポグラフィック独立成分分析
- word2vec 235
- 【あ】**
- 誤り訂正学習 (error correction learning) 12
- 暗黒知識 (dark knowledge) 138
- 鞍点 (saddle point) 85
- 言い換え表現認識 (paraphrase detection) 244
- 一対他符号化 (one-versus-rest encoding) ④ 1-of-*n* 表現
- 一般物体認識 (general object recognition) 153, 166
- ～の従来法 167
- 意味表現 (semantic representation) 232, 233
- 因子分析 (factor analysis) 8
- エネルギー関数 (energy function) 36
- エルマン・ネットワーク (Elman network) 211
- おばあさん細胞 (grandmother cell) 153
- 重み (weight) 10
- 重み共有 (weight sharing) 159
- 重み減衰 (weight decay) 164
- 音響モデル (acoustic model) 191
- 音声認識 (speech recognition) 190
- 音素 (phoneme) 189
- 音素文脈 (phonemic context) 192
- 温度パラメータ (temperature parameter) 110
- オンライン学習 (online learning) 13
- 【か】**
- 回帰結合ニューラルネットワーク (recurrent neural network) 211
- long short-term memory 法 214
- エルマン・ネットワーク 211
- 音響モデル 211
- 言語モデル 218
- 双方向型～ 211
- 階層型ソフトマックス (hierarchical softmax) 239
- 階層型ニューラルネットワーク (hierarchical neural network) 8, 127, 196
- ～の学習 12
- 誤差逆伝播法 14
- 深層～ ④ 深層ニューラルネットワーク
- ～モデル 9
- ガウス-ベルヌーイ型制限ボルツマンマシン (Gaussian-Bernoulli restricted Boltzmann machine) 202
- ガウス雑音 (Gaussian noise) 25
- 過学習 (over-fitting) 84, 139
- 係り受け解析 (dependency parsing) 225
- 学習率 (learning rate) 12, 164
- ～の調整 144
- 確率的グラフィカルモデル (probabilistic graphical model) ④ グラフィカルモデル
- 確率的勾配降下法 (stochastic gradient descent method) 14, 128
- 確率的最大プーリング (probabilistic max pooling) 181
- 隠れ層 (hidden layer) 11, 58
- 隠れ変数 (hidden variable) 40, 50, 94
- 隠れマルコフモデル (hidden Markov model) 192
- 深層ニューラルネットワーク～ 201
- ニューラルネットワーク～ 195
- 可視層 (visible layer) 58
- 可視変数 (visible variable) 40, 94
- 画像認識 (image recognition) 153
- 活性化関数 (activation function) 10, 142, 159
- ReLU～ 143
- 恒等～ 22

- しきい～ 10
- シグモイド～ 14
- ソフトマックス～ 157
- ガボールフィルタ (Gabor filter) 171
- カルバック-ライブラー・ダイバージェンス (Kullback-Leibler divergence) 43, 97
- 頑健性 (robustness) ㊦ ロバスト性
- 観測変数 (observable variable) ㊦ 可視変数
- 機械学習 (machine learning) 4
- 規格化定数 (normalization constant) 37, 94
- 擬似負例 (pseudo negative instance) 242
- 機能語 (function word) 242
- ギブスサンプラー (Gibbs sampler) ㊦ ギブスサンプリング
- ギブスサンプリング (Gibbs sampling) 52
- ギブス分布 (Gibbs distribution) ㊦ ボルツマン分布
- 逆畳み込みネットワーク (deconvolutional network) 175
- 競合学習 (competitive learning) 15
- 教師あり学習 (supervised learning) 12
- 教師なし学習 (unsupervised learning) 12
- 共有重み (shared weight) 159
- 局所コントラスト正規化 (local contrast normalization) 164
- 局所最適解 (local optimum) 15, 85
- 局所特徴 (local feature) 167
- 極端学習機械 (extreme learning machine) 116
- 組み合わせ爆発 (combinatorial explosion) 45
- グラフィカルモデル (graphical model) 37
- グリッド探索 (grid search) 146
- 経験分布 (empirical distribution) 43
- 継続的コントラストティブ・ダイバージェンス法 (persistent contrastive divergence method) 109
- 系列識別学習 (sequence discriminative training) 207
- 欠落雑音 (masking noise) 25
- 言語モデル (language model) 192, 228
- ニューラルネットワーク～ 229
- 減算正規化 (subtractive normalization) 164
- 交換モンテカルロ法 (exchange Monte Carlo method) 110
- 交互構造最適化 (alternating structural optimization) 227
- 交互最適化 (alternating optimization) 238
- 交差エントロピー (cross entropy) 163, 199
- 恒等関数 (identity function) 22
- 勾配降下法 (gradient descent method) 45, 127
- 勾配消失問題 (vanishing gradient problem) 18, 214
- 勾配上昇法 (gradient ascent method) ㊦ 勾配降下法
- コーパス (corpus) 228
- 誤差逆伝播法 (backpropagation method) 14, 127
- 内部表現学習 16
- コスト関数 (cost function) ㊦ 損失関数
- ごま塩雑音 (salt-and-pepper noise) 25
- 混合正規分布 (Gaussian mixture model) 192
- コントラストティブ・ダイバージェンス (contrastive divergence) 103
- コントラストティブ・ダイバージェンス法 (contrastive divergence method) 99
- 継続的～ 109
- 損失関数 100

【さ】

- 再帰自己符号化器 (recursive autoencoder) 244
- 再帰ニューラルネットワーク (recursive neural network)
- 再帰自己符号化器 244
- 展開再帰自己符号化器 246
- 最急勾配降下法 (steepest gradient descent method) ㊦ 勾配降下法
- 再構成型 TICA (reconstruction TICA) ㊦ 再構成型トポグラフィック独立成分分析
- 再構成型トポグラフィック独立成分分析 (reconstruction topographic independent component analysis) 182
- 再構成誤差 (reconstruction error) 92
- 最小確率流法 (minimum probability flow method) 108
- 最大事後確率推定 (maximum a posteriori estimation) 34
- 最大相互情報量規準 (maximum mutual information criterion) 208
- 最大プーリング (max pooling) 160
- 最尤推定 (maximum likelihood estimation) 41
- 最尤推定量 (maximum likelihood estimator) 41
- 雑音除去自己符号化器 (denoising autoencoder) 25, 115, 204

- 時間遅れニューラルネットワーク (time-delay neural network) 197
- しきい関数 (threshold function) 10
- 識別的事前学習 (discriminative pre-training) 205
- シグモイド関数 (sigmoid function) 14
- シグモイド信念 (sigmoid belief) 39
- 次元削減 (dimension reduction) 5, 8
- 事後学習 (post-training) 227
- 自己符号化器 (autoencoder) 22, **91**, 178
- ～の学習 22
- 再帰～ 244
- 雑音除去～ 204
- ～の事前学習 93
- 周辺化雑音除去～ 115
- 縮小～ 25
- 深層～ 92
- スパース～ 24
- ～としての制限ボルツマンマシン 70
- 積層～ 70
- 展開再帰～ 246
- 変分～ 112
- 事後分布 (posterior distribution) 34
- 指数型ハーモニウム族 (exponential family harmonium) 96
- ギブスサンプリング 98
- 事前学習 (pre-training) 23, **88**, 112, 226
- 確率的モデルによる～ 93
- 雑音除去自己符号化器の～ 204
- 識別的～ 205
- 自己符号化器の～ 112
- 深層信念ネットワークの～ 74
- 深層ボルツマンマシンの～ 64
- 積層自己符号化器 113
- 自然言語処理 (natural language processing) 225
- 自然勾配法 (natural gradient method) 88
- 事前分布 (prior distribution) 34
- シナプス (synapse) 9
- 周辺化雑音除去自己符号化器 (marginalized denoising autoencoder) 115
- 縮小自己符号化器 (contractive autoencoder) 25
- 主成分分析 (principal component analysis) 8
- 出力関数 (output function) ㊦ 活性化関数
- 出力層 (output layer) 11
- 受容野 (receptive field) **11**, 159
- 条件付き独立性 (conditional independence) 59
- 詳細釣り合い条件 (detailed balance condition) 105
- 蒸留 (distillation) 137
- 除算正規化 (divisive normalization) 165
- 人工知能 (artificial intelligence) 3
- 深層階層型ニューラルネットワーク (deep hierarchical neural network) ㊦ 深層ニューラルネットワーク
- 深層学習 (deep learning) 3
- 深層自己符号化器 (deep autoencoder) 92
- 深層信念ネットワーク (deep belief network) 72
- ～の事前学習 74
- ～の推論 74
- 畳み込み～ 181
- 深層ニューラルネットワーク (deep neural network) 16
- 音響モデル 206
- ～の学習 17
- ～隠れマルコフモデル 201
- 言語モデル 218
- ～の事前学習 202
- 深層ニューラルネットワーク-隠れマルコフモデル (deep neural network-hidden Markov model) 201
- 深層ボルツマンマシン (deep Boltzmann machine) 62
- ～の学習 67
- ～の事前学習 64
- ～の利用法 71
- 推定 (estimation) 35
- 推論 (inference) 35
- 砂時計型ニューラルネットワーク (hourglass-type neural network) **22**, 91
- スパース自己符号化器 (sparse autoencoder) **24**, **179**
- スパース性 (sparseness) 7, 8
- 正規化定数 (normalization constant) ㊦ 規格化定数
- 制限ボルツマンマシン (restricted Boltzmann machine) **57**, 94, 202
- ガウス-ベルヌイ型～ 202
- ～の学習 60
- 自己符号化器としての～ 70
- ～の条件付き独立性 59
- ベルヌイ-ベルヌイ型～ 57

- 生成モデル (generative model) 33
- 正則化 (regularization) 24
- DropOut 142
- L_1 ~ 25
- 蒸留 138
- スパース~ 179
- 積層自己符号化器 (stacked autoencoder) 23, 70, 113
- ゼロ頻度問題 (zero-frequency problem) 194, 228
- 線形分離 (linear separation) 12
- 線形分離可能 (linearly separable) 13
- 全結合層 (fully connected layer) 157
- 潜在表現 (latent representation) 内部表現 157
- 潜在変数 (latent variable) 隠れ変数 157
- 相互結合ニューラルネットワーク (mutually connected neural network) 11
- 層ごとの貪欲学習 (greedy layer-wise training) 93, 112
- 双方向型回帰結合ニューラルネットワーク (bi-directional recurrent neural network) 211
- 疎性 (sparseness) スパース性 157
- ソフトマックス関数 (softmax function) 157
- ~出力層 198
- 損失関数 (loss function) 84, 127
- 【た】**
- 大域特徴 (global feature) 167
- 大語彙連続音声認識 (large vocabulary continuous speech recognition) 194
- 対数双線形 (log-bilinear form) 238
- 対数メルフィルタバンク特徴ベクトル (log Mel-filterbank feature vector) 203
- 対数尤度関数 (log-likelihood function) 41
- 多層ニューラルネットワーク (multi-layer neural network) 階層型ニューラルネットワーク
- 多層パーセプトロン (multi-layer perceptron) 階層型ニューラルネットワーク
- 畳み込み (convolution) 157
- 畳み込み深層信念ネットワーク (convolutional deep belief network) 181
- 畳み込み層 (convolution layer) 157
- 畳み込みニューラルネットワーク (convolutional neural network) 19, 156
- ~の学習 163
- ~の拡張 174
- 従来法との比較 170
- 全結合層 157
- 畳み込み層 157
- 内部表現 175
- 認識性能 173
- プーリング層 160
- マルチタスク学習 176
- 多様体学習 (manifold learning) 8
- 単語エラー率 (word error rate) 207
- 単語集合モデル (bag-of-words model) bag-of-words モデル
- 単語袋詰めモデル (bag-of-words model) bag-of-words モデル
- 単純パーセプトロン (simple perceptron) 12
- 中間層 (internal layer) 隠れ層
- 中心差分 (central difference) 147
- 超パラメータ (hyper parameter) 146
- 通時的誤差逆伝播法 backpropagation through time 法
- データ並列化 (data parallelism) 130
- 転移学習 (transfer learning) マルチタスク学習
- 展開再帰自己符号化器 (unfolding recursive autoencoder) 246
- 伝承サンプリング (ancestral sampling) 75
- 統計的機械学習 (statistical machine learning) 33
- 動的プーリング (dynamic pooling) 247
- 特徴 (feature) 5
- 特徴学習 (feature learning) 表現学習
- 特徴工学 (feature engineering) 7
- 特徴点 (feature point) 65
- 独立成分分析 (independent component analysis) 8
- トポグラフィック・マッピング (topographic mapping) 183
- トポグラフィック独立成分分析 (topographic independent component analysis) 182
- 再構成型~ 182
- トライグラム (trigram) n グラム
- 【な】**
- 内部共変量シフト (internal covariate shift) 136
- 内部表現 (internal representation) 5, 16
- 二分構文木 (binary parse tree) 244

- ニューラルネットワーク (neural network) 3
 回帰結合～ 211
 階層型～ 8
 ～-隠れマルコフモデル 195
 時間遅れ～ 197
 深層～ 16
 砂時計型～ 22
 相互結合～ 11
 多層～ ㊦ 階層型ニューラルネットワーク
 畳み込み～ 19, 156
 フィードフォワード型～ ㊦ 階層型ニューラルネットワーク
 ～の歴史 9
 ニューラルネットワーク-隠れマルコフモデル (neural network-hidden Markov model) 195
 タンデム方式 200
 ハイブリッド方式 198
 ニューラルネットワーク言語モデル (neural network language model) 229
 入力層 (input layer) 11
 ニューロン (neuron) 9
 ネオコグニトロン (neocognitron) 19
 ノイズ (noise) ㊦ 雑音
 脳神経系 (cerebral nerve system) 9, 176
 ノーフリーランチ定理 (no free lunch theorem) 6
- 【は】
-
- パーセプトロン (perceptron) 9
 ～学習 ㊦ 誤り訂正学習
 ～学習則の収束定理 13
 ～の限界 13
 多層～ ㊦ 階層型ニューラルネットワーク
 パーセプトロン学習 (perceptron learning) ㊦ 誤り訂正学習
 ハーモニウム (harmonium) ㊦ 制限ボルツマンマシン
 バイグラム (bigram) ㊦ n グラム
 白色化 (whitening) 165
 発音辞書モデル (pronunciation model) 192
 バックオフ平滑化 (back-off smoothing) 229
 バッチ学習 (batch learning) 13
 バッチ正規化 (batch normalization) 136
 ハフマン木 (Huffman tree) 239
 パラレル・テンパリング法 (parallel tempering method) ㊦ 交換モンテカルロ法
 反復的パラメータ混合法 (iterative parameter mixing method) 242
 ビジュアルワード (visual word) 169
 表現学習 (representation learning) 7, 178, 226
 ヒンジ損失 (hinge loss) 232
 品詞タグ付け (part-of-speech tagging) 225
 フィードフォワード型ニューラルネットワーク (feed-forward neural network) ㊦ 階層型ニューラルネットワーク
 フィッシャーベクトル (Fisher vector) 170
 プーリング (pooling) 21, 160, 170
 L_p ～ 160
 確率の最大～ 181
 最大～ 160
 動的～ 247
 平均～ 160
 プーリング層 (pooling layer) 160
 復号化器 (decoder) 92
 符号化器 (encoder) 92
 不変性 (invariance) 7, 89, 160, 174, 183, 238
 不要語 (stop word) 242
 プラトー (plateau) 85
 負例サンプリング (negative sampling) 241
 ブロック化ギブスサンプリング (blocked Gibbs sampling) 55
 分散の意味表現 (distributed semantic representation) 234
 分散並列計算 (distributed parallel computation) 130
 分子場近似 (molecular field approximation) ㊦ 平均場近似
 ㊦ 平均場近似
 分配関数 (partition function) ㊦ 規格化定数
 分布意味論 (distributional semantics) 229
 分布仮説 (distributional hypothesis) 233
 分布の意味構築 (distributional semantic composition) 243
 分布の意味表現 (distributional semantic representation) 234
 分布メモリ (distributional memory) 244
 文脈 (context) 229
 平滑化 (smoothing) 229
 平均場近似 (mean-field approximation) 55
 平均場方程式 (mean-field equation) 57
 平均プーリング (average pooling) 160
 ヘビサイド関数 (Heaviside function) ㊦ しきい関数

- 変分自己符号化器 (variational autoencoder) 112
 変分ベイズ法 (variational Bayes method) ㊦ 平均場近似
- ホップフィールド・ネットワーク (Hopfield network) 39
- ボルツマン分布 (Boltzmann distribution) 36
- ボルツマンマシン (Boltzmann machine) 37
 ~の学習 40
 ~の学習方程式 42
 ~の近似手法 52
 深層~ 62
 制限~ 57
- 【ま】**
-
- マルコフ確率場 (Markov random field) 35
- マルコフ性 (Markov property) 53
- マルコフ連鎖モンテカルロ法 (Markov chain Monte Carlo method) 52
- マルチストリーム学習 (multi-stream learning) 217
- マルチタスク学習 (multitask learning) 217, 233
 畳み込みニューラルネットワーク 176
- 醜いアヒルの子の定理 (ugly duckling theorem) 6
- ミニバッチ法 (mini batch method) 129
- 無向グラフ (undirected graph) 36
- メル周波数ケプストラム係数 (mel-frequency cepstral coefficient) 193
- モーメント・マッチング (moment matching) 42
- 目的関数 (objective function) ㊦ 損失関数
- モデル誤差 (model error) 51
- モデルバイアス (model bias) ㊦ モデル誤差
- モデル並列化 (model parallelism) 130
- モメンタム (momentum) 164
- 【や】**
-
- 尤度関数 (likelihood function) 41
- ユニグラム (unigram) ㊦ n グラム
- 【ら】**
-
- ランダム探索 (random search) 146
- リグレット (regret) 145
- 類推問題 (analogical reasoning problem) 242
- 連鎖律 (chain rule) 128
- 連続 bag-of-words モデル (continuous bag-of-words model) 235
- 連続スキップグラムモデル (continuous skip-gram model) 237
- ロス関数 (loss function) ㊦ 損失関数
- ロバスト性 (robustness) 7
- 【わ】**
-
- ワイングラス型ニューラルネットワーク (wine-glass-type neural network) ㊦ 砂時計型ニューラルネットワーク
- 話者適応 (speaker adaptation) 200

英文索引

【 Symbols / Numbers 】

1-of- n representation (1-of- n 表現) 133, 163, 229

【 A 】

acoustic model (音響モデル) 191
activation function (活性化関数) **10**, 142, 159
 identity – 22
 ReLU – 143
 sigmoid – 14
 softmax – 157
 threshold – 10
Adagrad 144
Adam 145
alternating optimization (交互最適化) 238
alternating structural optimization (交互構造最適化) 227
analogical reasoning problem (類推問題) 242
ancestral sampling (伝承サンプリング) 75
artificial intelligence (人工知能) 3
ASO \Leftrightarrow alternating structural optimization
autoencoder (自己符号化器) 22, **91**, 178
 contractive – 25
 deep – 92
 denoising – 204
 learning of – 22
 marginalized denoising – 115
 pre-training of – 93
 recursive – 244
 restricted Boltzmann machine as – 70
 sparse – 24
 stacked – 70
 unfolding recursive – 246
 variational – 112

average pooling (平均プーリング) 160

【 B 】

back-off smoothing (バックオフ平滑化) 229
backpropagation method (誤差逆伝播法) **14**, 127
 learning internal representation 16
backpropagation through time method 128, **212**
bag-of-features model (bag-of-features モデル) 169
bag-of-words model (bag-of-words モデル) **226**, 236
bag-of-visual-words model \Leftrightarrow bag-of-features model
batch learning (バッチ学習) 13
batch normalization (バッチ正規化) 136
bi-directional recurrent neural network (双方向型回帰結合ニューラルネットワーク) 211
bigram (バイグラム) \Leftrightarrow n -gram
binary parse tree (二分構文木) 244
blocked Gibbs sampling (ブロック化ギブスサンプリング) 55
BM \Leftrightarrow Boltzmann machine
BoF model \Leftrightarrow bag-of-features model
Boltzmann distribution (ボルツマン分布) 36
Boltzmann machine (ボルツマンマシン) 37
 approximation technique of – 52
 deep – 62
 learning of – 40
 learning equation of – 42
 restricted – 57
BoW model \Leftrightarrow bag-of-words model
BPTT method \Leftrightarrow backpropagation through time method

【C】

- CD method ㊦ contrastive divergence method
 CDBN ㊦ convolutional deep belief network
 central difference (中心差分) 147
 cerebral nerve system (脳神経系) 9, 176
 chain rule (連鎖律) 128
 CNN ㊦ convolutional neural network
 combinatorial explosion (組み合わせ爆発) 45
 competitive learning (競合学習) 15
 conditional independence (条件付き独立性) 59
 context (文脈) 229
 continuous bag-of-words model (連続 bag-of-words モデル) 235
 continuous skip-gram model (連続スキップグラムモデル) 237
 contractive autoencoder (縮小自己符号化器) 25
 contrastive divergence (コントラストティブ・ダイバージェンス) 103
 contrastive divergence method (コントラストティブ・ダイバージェンス法) 99
 loss function 100
 persistent - 109
 ConvNet ㊦ convolutional neural network
 convolution (畳み込み) 157
 convolution layer (畳み込み層) 157
 convolutional deep belief network (畳み込み深層信念ネットワーク) 181
 convolutional neural network (畳み込みニューラルネットワーク) 19, 156
 convolution layer 157
 difference from previous methods 170
 extension of - 174
 fully connected layer 157
 internal representation 175
 learning of - 163
 multitask learning 176
 pooling layer 160
 recognition performance 173
 corpus (コーパス) 228
 cost function (コスト関数) ㊦ loss function
 cross entropy (交差エントロピー) 163, 199
- 【D】
- DAE ㊦ deep autoencoder
 dark knowledge (暗黒知識) 138
 data parallelism (データ並列化) 130
 DBL method ㊦ detailed balance learning method
 DBM ㊦ deep Boltzmann machine
 DBN ㊦ deep belief network
 decoder (復号化器) 92
 deconvolutional network (逆畳み込みネットワーク) 175
 deep autoencoder (深層自己符号化器) 92
 deep belief network (深層信念ネットワーク) 72
 convolutional - 181
 inference of - 74
 pre-training of - 74
 deep Boltzmann machine (深層ボルツマンマシン) 62
 application of - 71
 learning of - 67
 pre-training of - 64
 deep hierarchical neural network (深層階層型ニューラルネットワーク) ㊦ deep neural network
 deep learning (深層学習) 3
 deep neural network (深層ニューラルネットワーク) 16
 acoustic model 206
 - -hidden Markov model 201
 language model 218
 learning of - 17
 pre-training of - 202
 deep neural network-hidden Markov model (深層ニューラルネットワーク-隠れマルコフモデル) 201
 denoising autoencoder (雑音除去自己符号化器) 25, 115, 204
 dependency parsing (係り受け解析) 225
 detailed balance condition (詳細釣り合い条件) 105
 detailed balance learning method (detailed balance learning 法) 104
 dimension reduction (次元削減) 5, 8
 discriminative pre-training (識別の事前学習) 205
 DistBelief 130
 distillation (蒸留) 137
 distributed parallel computation (分散並列計算) 130

- distributed semantic representation (分散的意味表現) 234
- distributional hypothesis (分布仮説) 233
- distributional memory (分布メモリ) 244
- distributional semantic composition (分布的意味構築) 243
- distributional semantic representation (分布的意味表現) 234
- distributional semantics (分布意味論) 229
- divisive normalization (除算正規化) 165
- DNN \Rightarrow deep neural network
- DNN-HMM \Rightarrow deep neural network-hidden Markov Model
- Downpour SGD 131
- DropOut 139
- linear regression 141
- dropout noise (欠落ノイズ) \Rightarrow masking noise
- dynamic pooling (動的プーリング) 247
- 【 E 】**
-
- EFH \Rightarrow exponential family harmonium
- ELM \Rightarrow extreme learning machine
- Elman network (エルマン・ネットワーク) 211
- empirical distribution (経験分布) 43
- encoder (符号化器) 92
- energy function (エネルギー関数) 36
- error correction learning (誤り訂正学習) 12
- estimation (推定) 35
- exchange Monte Carlo method (交換モンテカルロ法) 110
- exponential family harmonium (指数型ハーモニウム族) 96
- Gibbs sampling 98
- extreme learning machine (極端学習機械) 116
- 【 F 】**
-
- FA \Rightarrow factor analysis
- factor analysis (因子分析) 8
- feature (特徴) 5
- feature engineering (特徴工学) 7
- feature learning (特徴学習) \Rightarrow representation learning
- feature point (特徴点) 65
- feed-forward neural network (フィードフォワード型ニューラルネットワーク) \Rightarrow hierarchical neural network
- Fisher vector (フィッシャーベクトル) 170
- fully connected layer (全結合層) 157
- function word (機能語) 242
- 【 G 】**
-
- Gabor filter (ガボールフィルタ) 171
- Gaussian mixture model (混合正規分布) 192
- Gaussian noise (ガウス雑音) 25
- Gaussian-Bernoulli restricted Boltzmann machine (ガウス-ベルヌーイ型制限ボルツマンマシン) 202
- general object recognition (一般物体認識) 153, 166
- previous methods for – 167
- generative model (生成モデル) 33
- Gibbs distribution (ギブス分布) \Rightarrow Boltzmann distribution
- Gibbs sampler (ギブスサンプラー) \Rightarrow Gibbs sampling
- Gibbs sampling (ギブスサンプリング) 52
- global feature (大域特徴) 167
- GMM \Rightarrow Gaussian mixture model
- GPU 133
- gradient ascent method (勾配上昇法) \Rightarrow gradient descent method
- gradient descent method (勾配降下法) 45, 127
- grandmother cell (おばあさん細胞) 153
- graphical model (グラフィカルモデル) 37
- greedy layer-wise training (層ごとの貪欲学習) 93, 112
- grid search (グリッド探索) 146
- 【 H 】**
-
- harmonium (ハーモニウム) \Rightarrow restricted Boltzmann machine
- Heaviside function (ヘビサイド関数) \Rightarrow threshold function
- hidden layer (隠れ層) 11, 58
- hidden Markov model (隠れマルコフモデル) 192
- deep neural network – 201
- neural network – 195
- hidden variable (隠れ変数) 40, 50, 94
- hierarchical neural network (階層型ニューラルネットワーク) 8, 127, 196

- backpropagation method 14
 deep – ④ deep neural network
 learning of – 12
 – model 9
- hierarchical softmax (階層型ソフトマックス)
 239
- hinge loss (ヒンジ損失) 232
- HMM ④ hidden Markov model
- HNN ④ hierarchical neural network
- Hopfield network (ホップフィールド・ネット
 ワーク) 39
- hourglass-type neural network (砂時計型ニュー
 ラルネットワーク) 22, 91
- Huffman tree (ハフマン木) 239
- hyper parameter (超パラメータ) 146
- 【 I 】**
-
- ICA ④ independent component analysis
- identity function (恒等関数) 22
- ILSVRC 153
- image recognition (画像認識) 153
- independent component analysis (独立成分分
 析) 8
- inference (推論) 35
- InfiniBand 135
- input layer (入力層) 11
- internal covariate shift (内部共変量シフト) 136
- internal layer (中間層) ④ hidden layer
- internal representation (内部表現) 5, 16
- invariance (不変性) 7, 89, 160, 174, 183, 238
- iterative parameter mixing method (反復的パラ
 メータ混合法) 242
- 【 K 】**
-
- KL distance (KL 距離) ④ Kullback-Leibler
 divergence
- KL divergence (KL ダイバージェンス)
 ④ Kullback-Leibler divergence
- KL information (KL 情報量) ④ Kullback-
 Leibler divergence
- Kullback-Leibler divergence (カルバック-ライ
 ブラー・ダイバージェンス) 43, 97
- 【 L 】**
-
- L-BFGS method (L-BFGS 法) 131, 246
- L_1 regularization (L_1 正則化) 25
- language model (言語モデル) 192, 228
- neural network – 229
- large vocabulary continuous speech recognition
 (大語彙連続音声認識) 194
- lasso ④ L_1 regularization
- latent representation (潜在表現) ④ internal
 representation
- latent variable (潜在変数) ④ hidden variable
- LCA ④ local contrast normalization
- learning rate (学習率) 12, 164
 tuning of – 144
- LeNet ④ convolutional neural network
- likelihood function (尤度関数) 41
- limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-
 Shanno method ④ L-BFGS
 method
- linear separation (線形分離) 12
- linearly separable (線形分離可能) 13
- local contrast normalization (局所コントラスト
 正規化) 164
- local feature (局所特徴) 167
- local optimum (局所最適解) 15, 85
- log Mel-filterbank feature vector (対数メルフィ
 ルタバンク特徴ベクトル) 203
- log-bilinear form (対数双線形) 238
- log-likelihood function (対数尤度関数) 41
- long short-term memory method 214
- loss function (損失関数) 84, 127
- low effective dimension 146
- L_p pooling (L_p プーリング) 160
- LSTM method ④ long short-term memory
 method
- 【 M 】**
-
- machine learning (機械学習) 4
- manifold learning (多様体学習) 8
- MAP estimation (MAP 推定) ④ maximum a
 posteriori estimation
- marginalized denoising autoencoder (周辺化雑
 音除去自己符号化器) 115
- Markov chain Monte Carlo method (マルコフ
 連鎖モンテカルロ法) 52
- Markov property (マルコフ性) 53
- Markov random field (マルコフ確率場) 35
- masking noise (欠落雑音) 25
- max pooling (最大プーリング) 160

- maximum a posteriori estimation (最大事後確率推定) 34
 maximum likelihood estimation (最尤推定) 41
 maximum likelihood estimator (最尤推定量) 41
 maximum mutual information criterion (最大相互情報量規準) 208
 MaxOut 143
 mean-field approximation (平均場近似) 55
 mean-field equation (平均場方程式) 57
 Mel-frequency cepstral coefficient (メル周波数ケプストラム係数) 193
 MFCC ④ mel-frequency cepstral coefficient
 mini batch method (ミニバッチ法) 129
 minimum probability flow method (最小確率流法) 108
 MLE ④ maximum likelihood estimation
 MMI criterion (MMI 規準) ④ maximum mutual information criterion
 model bias (モデルバイアス) ④ model error
 model error (モデル誤差) 51
 model parallelism (モデル並列化) 130
 molecular field approximation (分子場近似) ④ mean-field approximation
 moment matching (モーメント・マッチング) 42
 momentum (モメンタム) 164
 MPF method ④ minimum probability flow method
 MRF ④ Markov random field
 multi-layer neural network (多層ニューラルネットワーク) ④ hierarchical neural network
 multi-layer perceptron (多層パーセプトロン) ④ hierarchical neural network
 multi-stream learning (マルチストリーム学習) 217
 multitask learning (マルチタスク学習) 217, 233
 convolutional neural network 176
 mutually connected neural network (相互結合ニューラルネットワーク) 11
 MV-RNN ④ matrix vector recursive neural network

[N]
 natural gradient method (自然勾配法) 88
 natural language processing (自然言語処理) 225
 negative sampling (負例サンプリング) 241
 neocognitron (ネオコグニトロン) 19
 neural network (ニューラルネットワーク) 3
 convolutional – 19, 156
 deep – 16
 feed-forward – ④ hierarchical neural network
 – hidden Markov model 195
 hierarchical – 8
 history of – 9
 hourglass-type – 22
 multi-layer – ④ hierarchical neural network
 mutually connected – 11
 recurrent – 211
 time-delay – 197
 neural network language model (ニューラルネットワーク言語モデル) 229
 neural network–hidden Markov model (ニューラルネットワーク–隠れマルコフモデル) 195
 hybrid approach 198
 tandem approach 200
 neuron (ニューロン) 9
n-gram (*n* グラム) 194, 226, 228
 NLMM ④ neural network language model
 NN ④ neural network
 NN-HMM ④ neural network–hidden Markov Model
 no free lunch theorem (ノーフリーランチ定理) 6
 normalization constant (規格化定数) 37, 94

[O]
 objective function (目的関数) ④ loss function
 observable variable (観測変数) ④ visible variable
 one-versus-rest encoding (一対他符号化) ④ 1-of-*n* representation
 online learning (オンライン学習) 13
 output function (出力関数) ④ activation function
 output layer (出力層) 11
 over-fitting (過学習) 84, 139

[P]
 parallel tempering method (パラレル・テンパ

- リング法) \Leftrightarrow exchange Monte Carlo method
 paraphrase detection (言い換え表現認識) 244
 part-of-speech tagging (品詞タグ付け) 225
 partition function (分配関数) \Leftrightarrow normaliza-
 tion constant
 PCA \Leftrightarrow principal component analysis
 perceptron (パーセプトロン) 9
 – learning \Leftrightarrow error correction learning
 – learning rule convergence theorem 13
 limitation of – 13
 multi-layer – \Leftrightarrow hierarchical neural network
 perceptron learning (パーセプトロン学習)
 \Leftrightarrow error correction learning
 persistent contrastive divergence method (継続
 的コントラストティブ・ダイバージェンス法)
 109
 phoneme (音素) 189
 phonemic context (音素文脈) 192
 plateau (プラトー) 85
 PoE \Leftrightarrow product of experts
 pooling (プーリング) 21, **160**, 170
 average – 160
 dynamic – 247
 L_p – 160
 max – 160
 probabilistic max – 181
 pooling layer (プーリング層) 160
 post-training (事後学習) 227
 posterior distribution (事後分布) 34
 pre-training (事前学習) 23, **88**, 112, 226
 – of deep belief network 74
 – of deep Boltzmann machine 64
 – of denoising autoencoder 204
 discriminative – 205
 pre-training of – 112
 – by probabilistic models 93
 stacked autoencoder 113
 principal component analysis (主成分分析) 8
 prior distribution (事前分布) 34
 probabilistic graphical model (確率的グラフィ
 カルモデル) \Leftrightarrow graphical model
 probabilistic max pooling (確率的最大プーリ
 ング) 181
 product of experts 118
 pronunciation model (発音辞書モデル) 192
 pseudo negative instance (擬似負例) 242
 pyramid match kernel 170
- 【 R 】**
- random search (ランダム探索) 146
 RBM \Leftrightarrow restricted Boltzmann machine
 receptive field (受容野) **11**, 159
 reconstruction error (再構成誤差) 92
 reconstruction TICA (再構成型 TICA) \Leftrightarrow re-
 construction topographic independent compo-
 nent analysis
 reconstruction topographic independent compo-
 nent analysis (再構成型トポグラフィック独
 立成分分析) 182
 rectified linear unit \Leftrightarrow ReLU
 recurrent neural network (回帰結合ニューラル
 ネットワーク) 211
 acoustic model 211
 bi-directional – 211
 Elman network 211
 language model 218
 long short-term memory method 214
 recursive autoencoder (再帰自己符号化器) 244
 recursive neural network (再帰ニューラルネッ
 トワーク)
 recursive autoencoder 244
 unfolding recursive autoencoder 246
 regret (リグレット) 145
 regularization (正則化) 24
 distillation 138
 Dropout 142
 L_1 – 25
 sparse – 179
 ReLU **143**, 156
 representation learning (表現学習) 7, 178,
 226
 restricted Boltzmann machine (制限ボルツマン
 マシン) **57**, 94, 202
 – as autoencoder 69
 Bernoulli-Bernoulli – 57
 conditional independence of – 59
 Gaussian-Bernoulli – 202
 learning of – 60
 RNN \Leftrightarrow recurrent neural network,
 \Leftrightarrow recursive neural network
 robustness (ロバスト性) 7

【S】

saddle point (鞍点)	85
salt-and-pepper noise (ごま塩雑音)	25
Sandblaster L-BFGS	131
scale invariant feature transform	☞ SIFT
semantic representation (意味表現)	232, 233
sequence discriminative training (系列識別学習)	207
SGD	☞ stochastic gradient descent method
shared weight (共有重み)	159
SIFT	168
sigmoid belief (シグモイド信念)	39
sigmoid function (シグモイド関数)	14
simple perceptron (単純パーセプトロン)	12
smoothing (平滑化)	229
softmax function (ソフトマックス関数)	157
– output layer	198
sparse autoencoder (スパース自己符号化器)	24, 179
sparseness (スパース性)	7, 8
speaker adaptation (話者適応)	200
speech recognition (音声認識)	190
stacked autoencoder (積層自己符号化器)	23, 70, 113
statistical machine learning (統計的機械学習)	33
steepest gradient descent method (最急勾配降下法)	☞ gradient descent method
stochastic gradient descent method (確率的勾配降下法)	14, 128
stop word (不要語)	242
subtractive normalization (減算正規化)	164
supervised learning (教師あり学習)	12
synapse (シナプス)	9

【T】

TDNN	☞ time-delay neural network
temperature parameter (温度パラメータ)	110
threshold function (しきい関数)	10
TICA	☞ topographic independent component analysis
tied weight	☞ shared weight
time-delay neural network (時間遅れニューラルネットワーク)	197

topographic independent component analysis (トポグラフィック独立成分分析)	182
reconstruction –	182
topographic mapping (トポグラフィック・マッピング)	183
transfer learning (転移学習)	☞ multitask learning
trigram (トライグラム)	☞ n-gram

【U】

ugly duckling theorem (醜いアヒルの子の定理)	6
undirected graph (無向グラフ)	36
unfolding recursive autoencoder (展開再帰自己符号化器)	246
unigram (ユニグラム)	☞ n-gram
unsupervised learning (教師なし学習)	12

【V】

vanishing gradient problem (勾配消失問題)	18, 214
variational autoencoder (変分自己符号化器)	112
variational Bayes method (変分ベイズ法)	☞ mean-field approximation
visible layer (可視層)	58
visible variable (可視変数)	40, 94
visual word (ビジュアルワード)	169

【W】

weight (重み)	10
weight decay (重み減衰)	164
weight sharing (重み共有)	159
whitening (白色化)	165
wine-glass-type neural network (ワイングラス型ニューラルネットワーク)	☞ hourglass-type neural network
word error rate (単語エラー率)	207
word2vec	235

【Z】

zero-frequency problem (ゼロ頻度問題)	194, 228
---------------------------------	----------

執筆者紹介

第 1 章

麻生 英樹 (あそう ひでき)

産業技術総合研究所人工知能研究センター, 副研究センター長
機械学習とその応用

第 2 章

安田 宗樹 (やすだ むねき)

山形大学理工学研究科, 准教授
機械学習, 情報統計力学, 画像処理

第 3 章

前田 新一 (まえだ しんいち)

京都大学大学院情報学研究所, 助教
機械学習, 強化学習, 統計的画像処理

第 4 章

岡野原 大輔 (おかのほら だいすけ)

株式会社 Preferred Infrastructure, 株式会社 Preferred Networks, 取締役副社長
機械学習, 大規模データ解析, 自然言語処理, データ構造

第 5 章

岡谷 貴之 (おかたに たかゆき)

東北大学情報科学研究科, 教授
コンピュータビジョン

第 6 章

久保 陽太郎 (くぼ ようたろう)

Amazon, Speech Scientist
音声認識

第 7 章

ボレガラ ダヌシカ

University of Liverpool, Department of Computer Science, Associate Professor
自然言語処理, データマイニング, 機械学習

編集

神鷹 敏弘 (かみしま としひろ)

産業技術総合研究所, 主任研究員
データマイニング, 機械学習, 推薦システム

監修：人工知能学会 代表

松尾 豊 (まつお ゆたか)

東京大学大学院工学系研究科, 准教授, 前人工知能学会編集委員長
人工知能, ウェブ工学, ビッグデータ分析

松原 仁 (まつばら ひとし)

公立ほこだて未来大学システム情報科学部, 教授, 人工知能学会会長
人工知能

深層学習 – Deep Learning –

© 2015 Toshihiro Kamishima, Hideki Asoh,
Muneki Yasuda, Shin-ichi Maeda, Daisuke
Okano-hara, Takayuki Okatani, Yotaro Kubo,
Danushka Bollegala

Printed in Japan

2015 年 10 月 31 日 初版第 1 刷発行

監修者 人工知能学会

編者 神 寫 敏 弘

共著者 麻 生 英 樹
安 田 宗 樹
前 田 新 一
岡野原 大 輔
岡 谷 貴 之
久 保 陽 太 郎
ボレガラ ダヌシカ

発行者 小 山 透

発行所 株式会社 近代科学社

〒 162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-7-15
電話 03-3260-6161 振替 00160-5-7625
<http://www.kindaiagaku.co.jp>

藤原印刷 ISBN978-4-7649-0487-3

定価はカバーに表示してあります。

ISBN978-4-7649-0487-3
C3004 ¥3500E



9784764904873

定価(本体 3,500円+税)



1923004035009

Deep Learning

深層学習