

# 機械学習の発展

独立行政法人産業技術総合研究所  
知能システム研究部門

麻生 英樹

2015.3.27@日本太陽エネルギー学会  
太陽光発電部会第13回セミナー

## 統計的機械学習とは？

- 機械学習 (Machine Learning)
    - = 機械 (コンピュータ) が学習する、  
機械に知識を獲得させる
    - ≠ 機械を使って学習する  
(CAE, CAI, e-Learning)
  - 統計的機械学習
    - 知識 = 確率モデル
  - 非統計的機械学習
    - 知識 = if-thenルール、論理式、方程式
- 人工知能  
Artificial Intelligence  
の一分野として発足

# なぜ機械に「学習」させるのか？

- 知的な情報処理システム（人工知能）の実現
  - 非明示的知識の実装
  - 多様な対象や環境への対処
- 人間の学習・知能の解明
  - 構成的な知能研究（認知科学）
- データの利活用への応用
  - データのモデリングと推測

# 機械学習技術の発展の超概略

- 1958/9 パーセプトロン、チェッカー
- 1960～ 文法学習、バージョン空間、数学定理発見、...
- 1980～ ニューラルネット・コネクショニズム
  - 誤差逆伝播学習、連想記憶モデル、自己組織化モデル、ボルツマンマシン
- 1980～ 帰納論理プログラミング
- 1985～ ベイジアンネットワーク
- 1992～ カーネル法
  - サポートベクトルマシン、カーネル主成分分析
- 2000～ パターン認識等への応用の展開、急速な進展
- 2000～ ベイズモデリング
- 2006～ Deep Learning

# 統計的機械学習研究の源流

- 学習するチェッカープログラム
  - Arthur Lee Samuel: Some studies in machine learning using the game of checkers, 1959
  - 対戦結果から盤面評価関数を学習して強くなる
  - 強化学習の源流
- パーセプトロン
  - Frank Rosenblatt: The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain, 1958
  - 脳の構造を模倣し、事例から学習するパターン認識装置

## パターン認識

- パターン情報：時間的・空間的に広がりを持って分布する大量の情報
  - 画像、音声・音楽、動画
- パターン認識：パターン情報を分類・識別・認証・理解する情報処理
  - 文字認識、指紋認証、顔認識、表情認識、一般物体認識、自然言語理解
  - 音声認識、音楽理解
  - 動画理解

# 手書き数字認識



MNIST 手書き数字データ

# パターン認識

- パターン認識はコンピュータには難しいタスク
  - 1950年代から研究
  - 手書き数字認識実用化 1980年代
  - 音声認識商用化 1990年代
  - 顔認識商用化 2000年代
- 人間は無意識のうちに簡単にやっている  
 どうやっているのかは意識に登らない  
 ➡ プログラムが書けない

# 顔画像認識

- コンピュータに画像を認識させるプログラムを書くのは難しい

– 顔画像には、人の情報以外に膨大な情報が混在している

- 顔の向き、大きさ、傾き
- 表情
- 背景
- 光線のあたり方

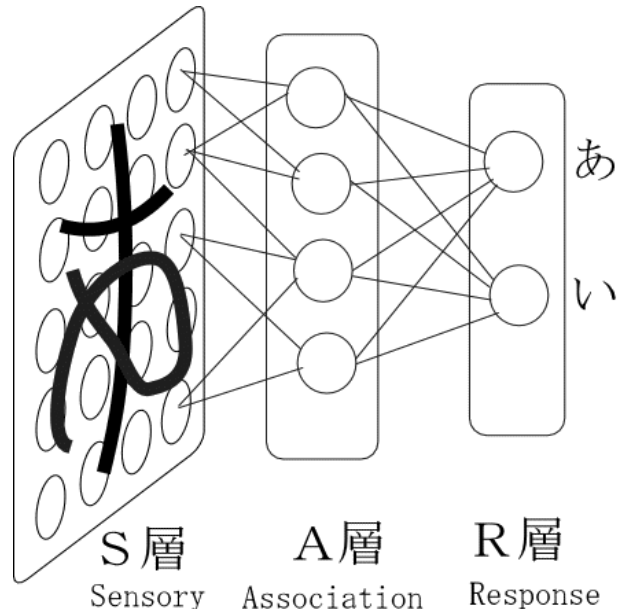
顔認識にとっては雑音

雑音の中から  
欲しい情報を抽出  
する方法を  
たくさんの例から  
学習させる

# パーセプトロン

[Rosenblatt 1958]

- 脳の構造を模擬した、例から学習するパターン認識装置



## 統計的パターン認識

- 入力パターン
- ↓ – 例：画像 = 1024x1024画素x256階調x3
- 前処理・正規化
- ↓ – 位置や明るさの正規化
- 特徴抽出
- ↓ – 数10～数100次元のベクトル
- 統計的識別
- ↓ – 特徴ベクトルの識別
- 出カクラス

## 統計的パターン認識

- 統計的機械学習の最も成功している応用
  - 実用段階
    - 郵便番号読み取り、ナンバープレート読み取り、手書き漢字認識、顔認識、表情認識、指紋などの生体認証、音声認識、Spam Filter
    - クレジットリスク診断、ネットワーク異常診断、各種製品検査、プロセス診断、GeneFinding、反応活性識別、自動走行車、音声Q&A、・・・
  - 研究段階
    - 音声対話、一般物体認識、一般行動認識、知的車椅子、盲人ナビゲーション、・・・

# 進歩の影にベンチマーク用データ

- ETL文字データベース
  - 印刷漢字、手書き漢字
- NIST手書き数字データ
- DARPA音声認識コンペティション
- RWC研究用音楽データベース
- Penn Tree Bank
  - 自然言語処理
- ImageNet
  - 一般物体認識

# 機械学習とデータマイニング

- 機械学習 (1959～)
  - 人工知能・パターン認識からの発想
  - コンピュータに学習させる
    - ゲームの学習、経験（観測データ）からの学習
  - 潜在変数を含む複雑なモデルの獲得を志向
  - 人間の学習のモデル化
  - いろいろなアプローチ⇒確率的アプローチに収束
- データマイニング (1990～)
  - データベースからの発想
  - データに内在する規則性・知識・法則の発見
  - 大量データのオンライン・リアルタイム処理志向
  - 条件を満たすデータやルールの枚挙が基本

# 統計科学・機械学習・ データマイニング

## 統計的機械学習

(1958～)

人工知能・パターン認識  
人間や生物の学習を  
コンピュータで模擬

## データマイニング

(1990年代後半～)

データベースシステム  
大規模データからの  
パターン・知識発見

## 統計科学

(18世紀末～)

母集団に関する推測  
区間推定・検定・因果推論

## 統計的機械学習の問題設定

- 知的な情報処理の主要な問題は  
観測可能・容易な変数から  
観測不能・困難な変数を推測すること
  - 外観から食べられるか否かを推測する
  - 顔画像や指紋から人のIDを識別する
  - 音声信号から発話しようとした言葉・意図を推測する
  - テストの結果から能力を推測する
  - アンケート情報から嗜好を推測する
  - 抜き取りサンプルから製品の不良率を推定する
  - 過去の情報から未来を予測する
  - 外観や特徴から対象を分類する
  - 受信符号から送信情報を推定する



# 統計的機械学習の問題設定

- なぜ推測できるのか？

⇒ 観測可能変数の値と観測不能変数の値の間に制約関係がある

- 変数間の制約関係 = 知識

- 決定論的アプローチ:

制約 = 知識をルール (if-then など)、関数、論理式、方程式、プログラム等で記述する

- 確率統計的アプローチ:

制約 = 知識を確率分布で記述する  
(決定論的アプローチ + 雑音モデル)

決定論 C 確率論

17

# 確率統計的な情報処理

- X : 観測可能な変数
- Y : 観測困難な変数 (隠れ変数・潜在変数)

- 知識 : 同時確率分布や条件付き確率分布

$$p(x, y) = p(X = x, Y = y)$$

- 隠れ変数の推測 :  
変数 X の値 x が観測されたときの  
Y の値 y の事後確率分布の計算

ベイズの定理

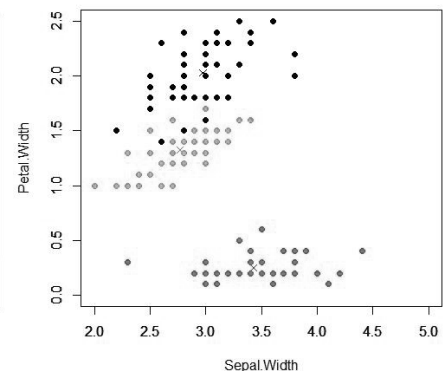
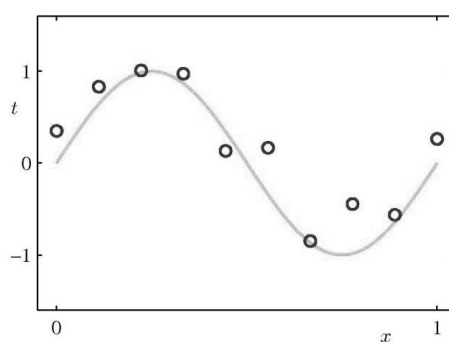
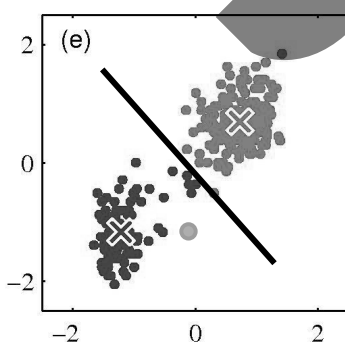
$$p(y|x) = \frac{p(x, y)}{p(x)} = \frac{p(x, y)}{\sum_{y'} p(x, y')} = \frac{p(x|y)p(y)}{\sum_{y'} p(x|y')p(y')}$$

# 生成モデルと識別モデル

- 生成モデル：データの生成過程のモデル  $P(X|Y)$  と事前確率  $P(Y)$  をモデル化して、 $P(Y|x)$  を推定
  - ナイーブベイズモデル
  - 混合正規分布モデル
  - 隠れマルコフモデル (HMM)
- 識別モデル：条件付き確率  $P(Y|x)$  あるいは  $P(Y|x)$  を最大にする  $y = f(x)$  を直接モデル化
  - 線形回帰、ロジスティック回帰
  - ニューラルネットワーク
  - サポートベクトルマシン

# 統計的機械学習の問題設定

- 教師あり学習 (Supervised Learning: 予測)
  - 識別問題 (出力が離散クラス) : パターン識別
  - 回帰・予測問題 (出力が連続値)
- 教師なし学習 (Unsupervised Learning: 分類)
  - 分類・クラスタリング
  - 次元圧縮、スパースモデリング



[C. Bishop: Pattern Recognition and Machine Learning, 2006] より引用

# 統計的機械学習の問題設定

- 半教師あり学習
- 報酬学習・強化学習
- Transductive Learning
- 転移学習
- 構造的学習
- 公正配慮学習
- . . . .

## まとめ

- **機械学習 = 機械に学習させる**
  - 非明示的知識の獲得
  - ロバストで適応的な情報処理
  - 人間の学習のモデル化
  - データの利活用
- **統計的機械学習**
  - 知識を確率分布で表現する
  - データの背後に確率分布を想定する
  - 生成モデルと識別モデル
  - 様々な分野での応用

# 機械学習技術の発展の超概略

- 1958/9 パーセプトロン、チェッカー
- 1960～ 文法学習、バージョン空間、数学定理発見、...
- 1980～ ニューラルネット・コネクショニズム
  - 誤差逆伝播学習、連想記憶モデル、自己組織化モデル、ボルツマンマシン
- 1980～ 帰納論理プログラミング
- 1985～ ベイジアンネットワーク
- 1992～ カーネル法
  - サポートベクトルマシン、カーネル主成分分析
- 2000～ パターン認識等への応用の展開、急速な進展
- 2000～ ベイズ統計モデリング
- 2006～ Deep Learning

## Deep Learning (深層学習)

- 層の数が多い (深い)  
ニューラルネットワークを用いた  
機械学習
- 抽象度の高い特徴量や内部表現を  
大量の生データから学習

## なぜ今話題になっているのか？

- パターン認識タスクを中心に、従来の方式よりも大幅な性能向上を達成した
- 音声認識
  - 連続音声認識での単語誤り率 23.6% → 16.1% (2011)
- 画像認識
  - 1000クラスの一般物体画像認識で  
Top-5 誤り率 26%程度 → 15.3% (2012) → 4%台 (2015)
- Science, Nature に論文が出た [Hinton+ 06, Mnih+ 15]
- Google, Microsoft, Facebook, Baido が強くコミット

## ニューラルネットワーク

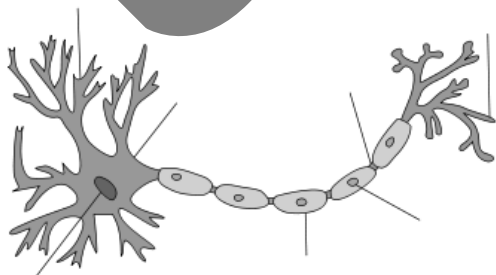
- 生物の神経回路網のモデル
- 脳は生物の進化が生んだ、  
とても優れた情報処理装置
- 脳の情報処理方式を模擬した  
情報処理方式の研究

# 脳の情報処理原理

- 脳：神経細胞（ニューロン）のネットワーク
- 神経細胞：多入力 1 出力の情報処理素子
- コラム構造：特定の情報に対して選択的に活動するモジュール
- 階層構造：異なる機能の領野が階層的に構築されている
- 脳の学習：細胞間の結合部位（シナプス）での信号伝達効率の変化
  - クラスタリング、識別、強化学習、...

# ニューラルネットワーク

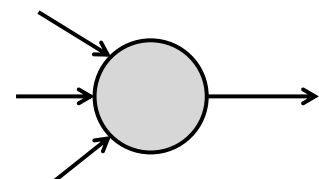
- 脳を模擬した、経験から学習する  
並列・分散パターン情報処理システム
- 単純な情報処理をするニューロンモデルのネットワーク
- ニューロンモデル間の結合重みの変化で学習



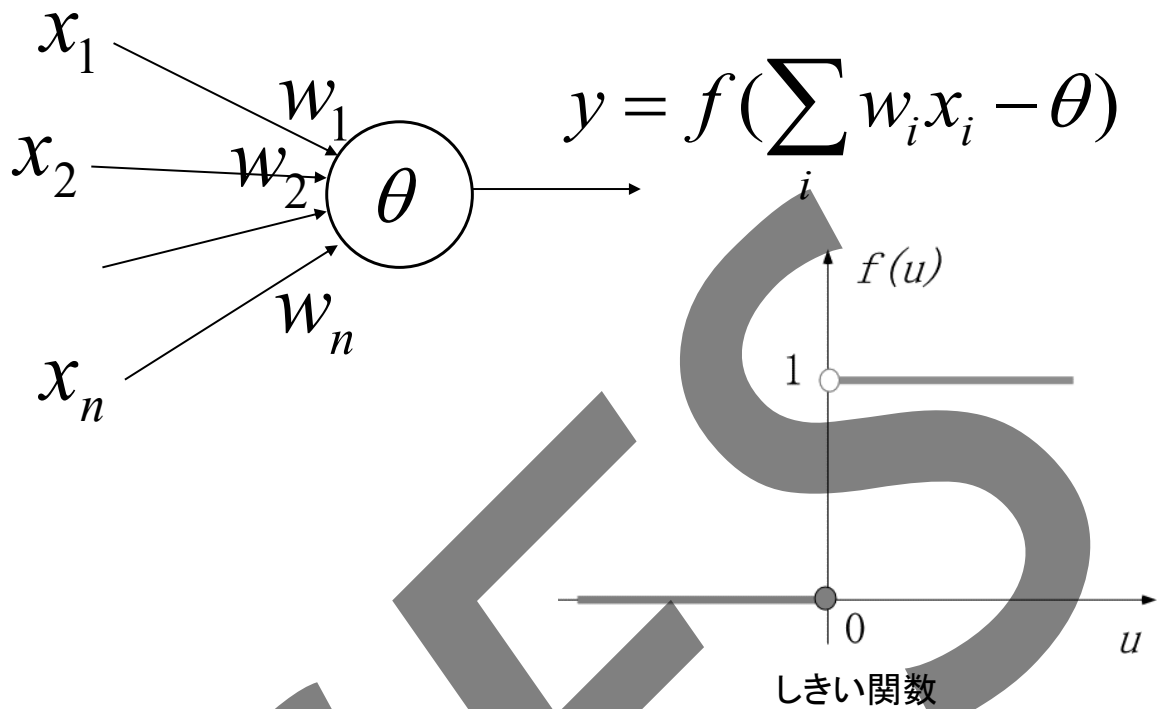
Wikipedia より



モデル化



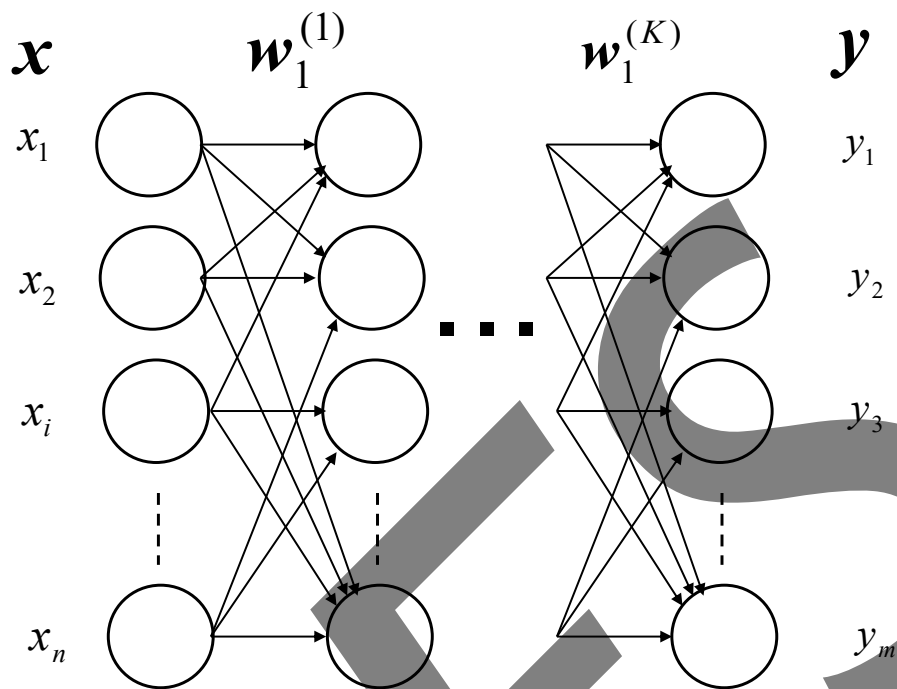
# 神経細胞の数理モデル



# ネットワークの構造

- 階層型
  - ニューロンが複数の層に分かれている
  - 入力層から出力層に向かう結合
- 相互結合同型・再帰結合同型
  - ニューロン間が相互に結合している

# 階層型ニューラルネット



## 階層型ニューラルネットの学習

- 教師あり学習：入力に対して、正解に近い出力を出すように結合の重み  $w$  やしきい値  $\theta$  を調整する
- 誤り訂正学習 (パーセプトロン学習) (1958)
- 誤差逆伝播学習 (1986)



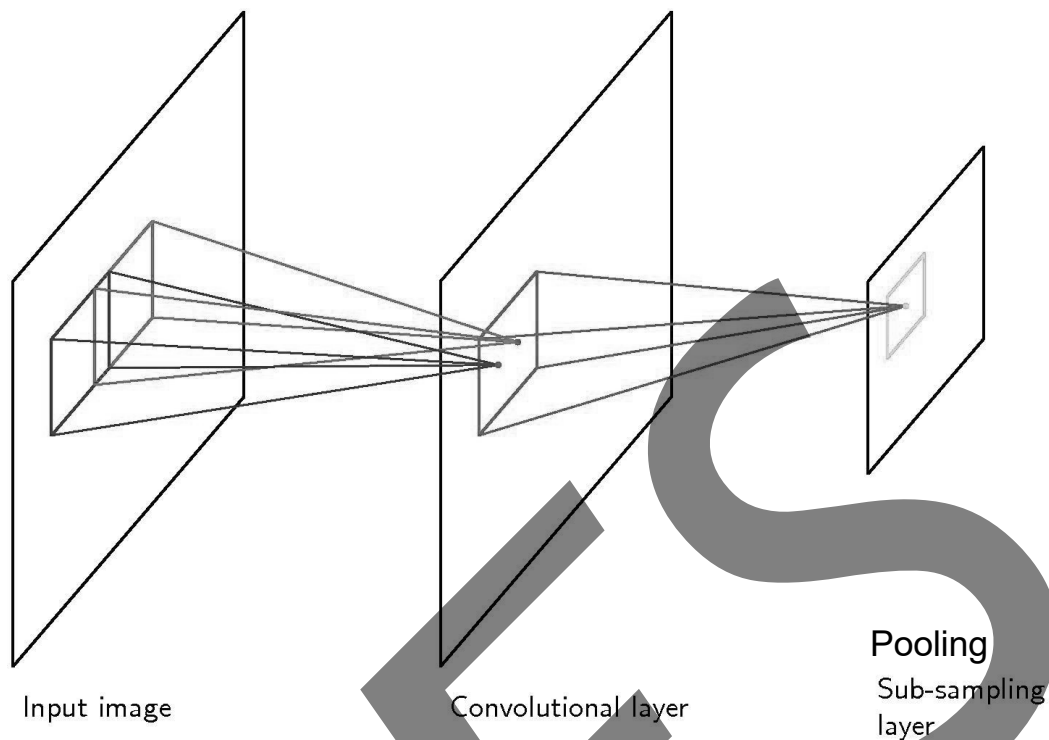
# ニューラルネットの発展の超概略

- 1943年 マッカロー・ピッツのニューロンモデル
- 1949年 ヘブの学習則
- 1958年 パーセプトロン [Rosenblatt]
- 1969年 「パーセプトロン」 [Minsky + Papert]
- 1970年頃 小脳パーセプトロン説
- 1982年 連想記憶モデル [Hopfield]
- 1983年 ボルツマン・マシン [Hinton]
- 1986年 誤差逆伝播学習法 [Rumelhart]
- (1992年 サポートベクトルマシン [Vapnik])

## Deep Learning

- Deep = 多層のニューラルネットワーク
  - 能力は高いが学習が困難
  - 特に誤差逆伝播学習は層が増えると困難
    - 局所収束 + 学習の遅さ
- ブレークスルー (2006~)
  - 1) 問題に適した構造を予め組み込む
    - 畳み込みネットワーク
  - 2) 層ごとの教師無し事前学習
    - Restricted Boltzmann Machine
    - Stacked Auto Encoder

# 畳み込みネットワーク



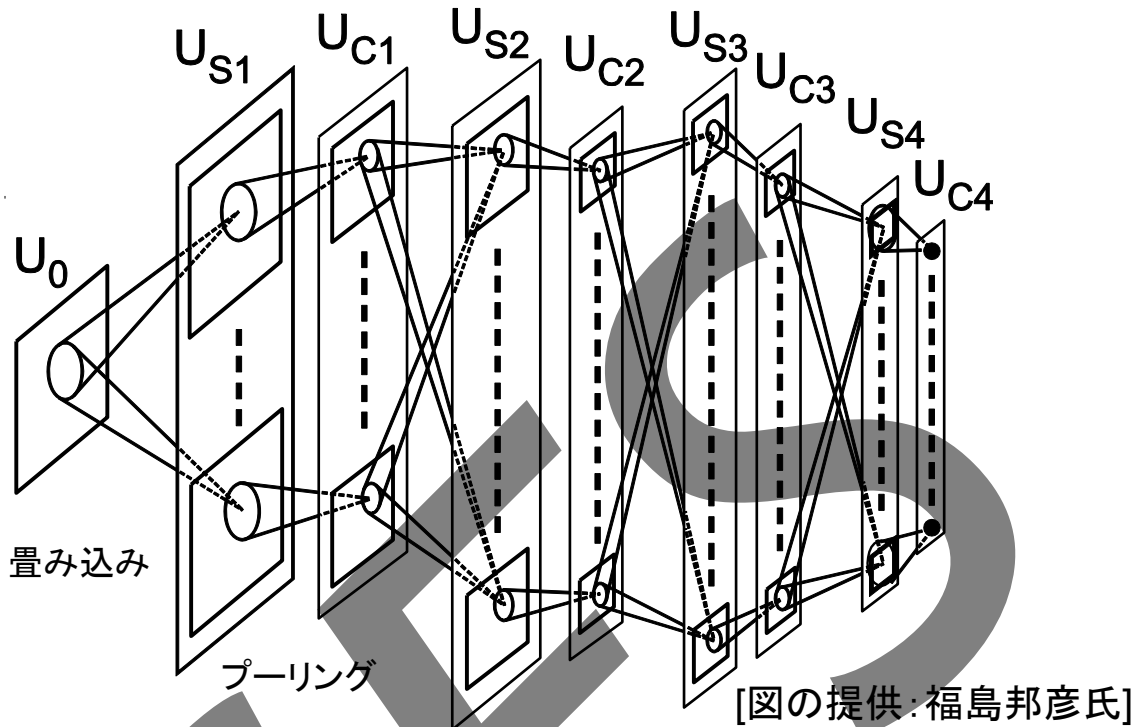
[C. Bishop: Pattern Recognition and Machine Learning, 2006] より引用

# 畳み込みネットワーク

- 同一の局所的フィルタを画像全体に適用
- 結合の値が共有されている  
= パラメータ数が小さくなる
- プーリング（固定結合）で  
近傍ニューロンの出力を集約  
= 平行移動に不変な処理結果
- 画像認識（平行移動不変なタスク）に  
適したネットワーク構造

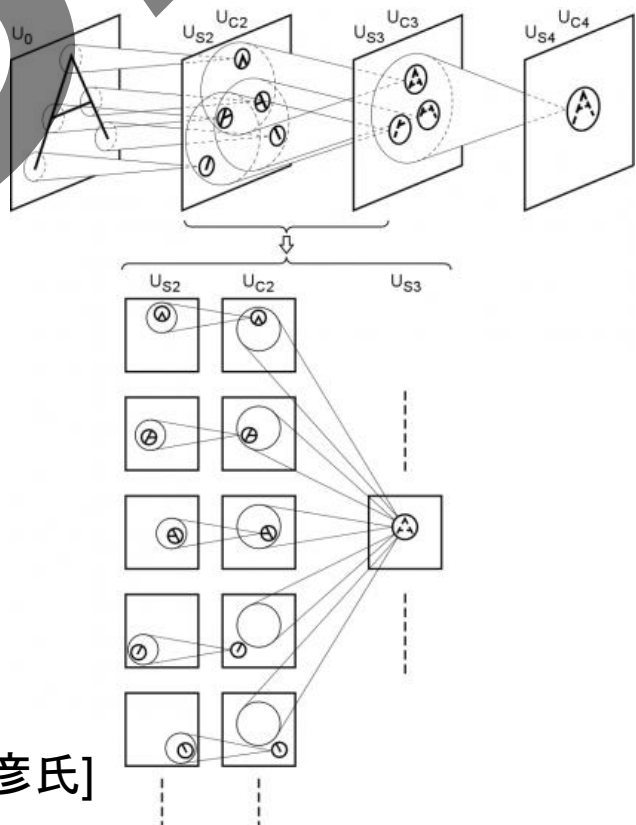
# 畳み込みネットワーク

- ネオコグニトロン [福島 1981]



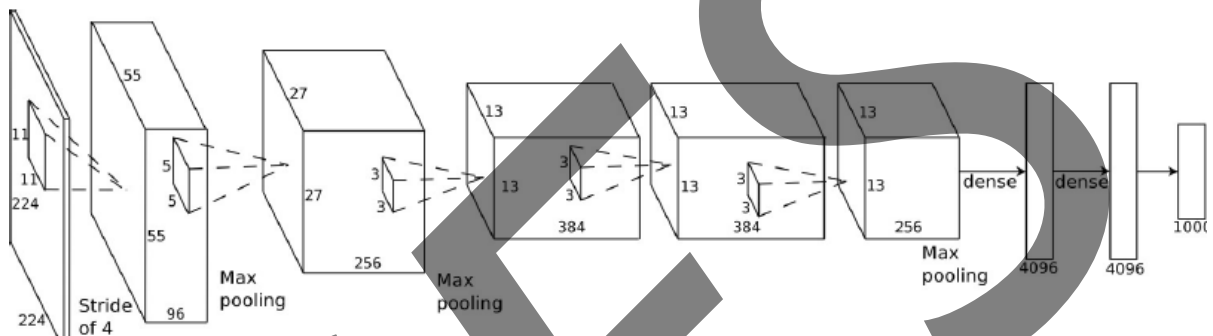
# 多層化の効果

- 入力に近い層では局所的な特徴を抽出
- 深い層では、より大域的・抽象的な特徴が抽出される



# SuperVision [Krizhevsky, Sutskever, Hinton, 2012]

- タスク：一般物体認識、検索 (ImageNet Competition)
  - 224x224 RGB画像 ⇒ 1000 カテゴリ
- ネットワークアーキテクチャ：
  - 12層 (学習する隠れ層は7層)
  - 入力層 - 5つの畳み込み層 - 2つの全結合層 - 出力層
  - 出力ニューロン数 1,000個
  - 全ニューロン数 65万個、全パラメータ数 6千万



[Krizhevsky+: ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, 2012 より引用]

## 過学習を防ぐ工夫

- データの水増し
  - 256x256画像から 224x224画像を切りだし
  - 学習用データの枚数を増やす
- Drop Out 学習
  - 学習データごとにランダムに半分のニューロンを消去 (マスク) して学習する
  - 学習が終わったらすべての重みを 1/2 にする
  - 複数のモデルを並行的に学習して、それらの平均を取ること (Bagging) を近似的に実現

## 層ごとの事前学習

- 今回の Deep Learning 研究の源となったアイデアのひとつ
- 全体を教師あり学習するのが難しい
  - 層ごとに学習させる
  - 各層に何を学習させればよいか不明
  - 教師無し学習させる
- アイデア自体はこれも古くからあった例：ネオコグニトロン [福島 1981]


## 層ごとの事前学習の方法

- 制限つきボルツマンマシン  
Restricted Boltzmann Machine (RBM)  
を使う方法 [Hinton+ 2006]
- 誤差逆伝播学習を使う方法  
[Bengio+ 2007]
- 競合学習を使う方法 [福島 1981]

# Deep Learning の成功

- 画像認識・理解・修復
  - 手書き文字認識、一般物体認識、道路標識認識、顔認識、医療画像認識、歩行者検出、...
- 音声認識
  - Google音声認識、MS音声認識、...
- 自然言語処理
  - 語彙タグづけ、感情認識、類似文検索、機械翻訳、画像や動画の言語化
- 薬物活性予測
- 高分子エネルギー計算（量子化学）
- 囲碁の盤面評価
- 強化学習（昔のコンピュータゲーム）

## まとめ：Deep Learning

- 多層のニューラルネットワークモデルによる抽象度の高い、情報圧縮された良い内部表現の発見
  - 大量のデータでの（層ごとの）効率のよい学習法と実装
- 
- 教師あり学習（パターン認識や関数近似）で高い性能向上

## 研究・応用の展開

- 高精度化・高速化・省電力化
  - 領域固有知識の導入、大規模化、多層化
  - アンサンブル化
  - 並列実装、GPU, FPGAの利用、チップ化  
16 core CPU x 1000 x 3 days → (2 x 4 core CPU + 4 x GPU) x 16 x 3 days
- 新アルゴリズム開発 Drop Out, Max Out, ...
- 理論基盤研究
  - 理論的性能保証、手法間の関連性
- 新しい問題への適用
  - 求人票の給与予測、コンピュータゲーム、画像・動画の言語化、機械翻訳、...

## 参考文献

- C. ビショップ：パターン認識と機械学習（上下），シュプリンガー・ジャパン（2007,2008）
- 杉山将：イラストで学ぶ機械学習，講談社サイエンティフィック，2014
- 谷口忠大：イラストで学ぶ人工知能，講談社サイエンティフィック，2014
- 人工知能学会誌 連続解説「深層学習」，2013/5～（隔月）
- 岡谷貴之：深層学習，講談社サイエンティフィック，2015/4（予約受付中）

## 参考文献

- G. Hinton and R. Salakhutdinov: Reducing the dimensionality of data with neural networks, Science, 2006
- Y. Bengio+: Greedy layer-wise training of deep networks, Advanced in Neural Information Processing Systems 19, 2007
- Y. Bengio+: Representation learning: a review and new perspectives, arXiv:1206.5538, 2012
- A. Krizhevsky+: ImageNet classification with deep convolutional neural networks, NIPS 2012, 2012

## 参考文献

- Le+ : Building High-level features using large scale unsupervised learning, ICML 2012, 2012
- Taigman+: Deep Face: closing the gap to human-level performance in face verification, 2014
- O. Vinyals+: Show and Tell: a neural image caption generator, arXiv:1411.4555, CVPR 2014, 2014
- I. Sutskever+: sequence to sequence learning with neural networks, arXiv:1409.3215, 2014
- V. Mnih+: Human-level control through deep reinforcement learning, Nature 14236, 2015