

# 目 次

監訳者まえがき	iii
まえがき	vii
第 1 章 はじめに	1
1.1 背景	2
1.1.1 2つの学問の融合	2
1.1.2 量子機械学習のはじまり	5
1.1.3 4つのアプローチ	6
1.1.4 教師あり学習のための量子計算	9
1.2 量子コンピュータによるデータの識別	10
1.2.1 二乗距離識別器	10
1.2.2 アダマール変換による干渉	12
1.2.3 量子二乗距離識別器	17
1.2.4 簡単な例から得られる知見	21
1.3 本書の構成	22
参考文献	23
第 2 章 機械学習	25
2.1 推定	26
2.1.1 推定に関する 4つの事例	27

2.1.2	教師あり学習	30
2.2	モデル	32
2.2.1	データはいかに推定モデルを導き出すか	36
2.2.2	モデルの質の把握	38
2.2.3	ベイズ学習	40
2.2.4	カーネルと特徴写像	43
2.3	学習	47
2.3.1	コスト関数	48
2.3.2	確率的勾配降下法	51
2.4	機械学習の手法	53
2.4.1	データフィッティング	54
2.4.2	人工ニューラルネットワーク	59
2.4.3	グラフィカルモデル	73
2.4.4	カーネル法	79
	参考文献	86

### 第3章 量子情報入門 89

3.1	量子論の入門	90
3.1.1	量子論とは	90
3.1.2	量子論のはじめ	92
3.1.3	量子力学の仮定	99
3.2	量子計算入門	107
3.2.1	量子計算とは何か	107
3.2.2	古典ビットと量子ビット	110
3.2.3	量子ゲート	115
3.2.4	量子並列性と関数値評価	118
3.3	Deutsch-Josza のアルゴリズム	121
3.3.1	Deutsch のアルゴリズム	121
3.3.2	Deutsch-Josza のアルゴリズム	123
3.3.3	量子アニーリングと他の計算モデル	125

3.4	情報の符号化の方法 .....	127
3.4.1	計算基底符号化 .....	128
3.4.2	振幅符号化 .....	130
3.4.3	量子サンプル状態符号化 .....	132
3.4.4	ハミルトニアン符号化 .....	132
3.5	重要な量子ルーチン .....	134
3.5.1	グローバ探索 .....	134
3.5.2	量子位相推定 .....	136
3.5.3	行列の乗算と逆行列 .....	139
	参考文献 .....	144
 <b>第4章 量子優位性</b>		<b>149</b>
4.1	学習の計算複雑性 .....	149
4.2	サンプル複雑性 .....	155
4.2.1	メンバシップクエリからの厳密な学習 .....	157
4.2.2	事例からの PAC 学習 .....	158
4.2.3	ノイズの導入 .....	159
4.3	モデル複雑性 .....	160
	参考文献 .....	162
 <b>第5章 情報の符号化</b>		<b>165</b>
5.1	計算基底符号化 .....	167
5.1.1	入力の重ね合わせ状態の準備 .....	169
5.1.2	計算基底符号化での計算 .....	172
5.1.3	量子ビットからのサンプリング .....	173
5.2	振幅符号化 .....	176
5.2.1	線形時間での量子状態準備 .....	178
5.2.2	量子ビット数に関して効率的な状態準備 .....	182
5.2.3	振幅を用いた計算 .....	188

5.3	量子サンプル状態符号化 .....	189
5.3.1	同時確率分布 .....	189
5.3.2	周辺化 .....	190
5.3.3	棄却サンプリング .....	191
5.4	ハミルトニアン符号化 .....	193
5.4.1	多項式時間ハミルトニアンシミュレーション .....	195
5.4.2	量子ビット数に関して効率的な ハミルトニアンシミュレーション .....	196
5.4.3	密度行列の指数関数化 .....	198
	参考文献 .....	201

## 第6章 推論のための量子計算 205

6.1	線形モデル .....	206
6.1.1	干渉回路による内積 .....	207
6.1.2	線形モデルとしての量子回路 .....	212
6.1.3	計算基底符号化における線形モデル .....	215
6.1.4	非線形活性化関数 .....	217
6.2	カーネル法 .....	223
6.2.1	カーネルと特徴写像 .....	224
6.2.2	表現定理 .....	226
6.2.3	量子カーネル .....	227
6.2.4	距離に基づいた識別器 .....	231
6.2.5	密度グラム行列 .....	236
6.3	確率モデル .....	240
6.3.1	確率モデルとしての量子サンプル状態 .....	240
6.3.2	条件付き独立性を持つ量子サンプル状態 .....	241
6.3.3	平均場近似の量子サンプル状態 .....	244
	参考文献 .....	246

<b>第7章 量子計算による学習</b>	<b>249</b>
7.1 量子 BLAS .....	250
7.1.1 基本的な考え方 .....	251
7.1.2 逆行列の計算法 .....	252
7.1.3 量子加速とさらなる応用 .....	258
7.2 探索と振幅増幅 .....	259
7.2.1 最近傍データの発見 .....	260
7.2.2 データの重ね合わせ状態に対するグローバ探索の適用 .....	262
7.2.3 振幅増幅によるパーセプトロンの学習 .....	264
7.3 さまざまなハイブリッドアルゴリズム .....	265
7.3.1 変分回路 .....	268
7.3.2 変分量子機械学習アルゴリズム .....	272
7.3.3 数値最適化法 .....	276
7.3.4 変分識別器の解析的な勾配 .....	280
7.4 量子断熱機械学習 .....	283
7.4.1 制約なし 2 次最適化問題 .....	284
7.4.2 サンプラーとしてのアニーリングマシン .....	285
7.4.3 他のデバイス例 .....	288
参考文献 .....	289
<b>第8章 量子モデルを利用した学習</b>	<b>293</b>
8.1 イジング模型の量子力学への拡張 .....	294
8.1.1 量子イジング模型 .....	296
8.1.2 量子ボルツマンマシンの訓練 .....	298
8.1.3 量子ホップフィールド模型 .....	301
8.1.4 他の確率モデル .....	303
8.2 変分回路とニューラルネットワーク .....	304
8.2.1 ニューラルネットワークの線形変換としての量子ゲート .....	305
8.2.2 モデルパラメータ数の考慮 .....	308

8.2.3 ユニタリ変換を用いた回路 .....	309
8.3 量子力学を利用したモデルに対する他のアプローチ .....	313
8.3.1 量子ウォークモデル .....	313
8.3.2 重ね合わせと量子アンサンブル .....	317
8.3.3 QBoost .....	320
参考文献 .....	322
<b>第9章 これからの量子機械学習</b> .....	<b>327</b>
9.1 スモールデータ vs ビッグデータ .....	328
9.2 ハイブリッドアプローチ vs 完全なコヒーレントアプローチ .....	331
9.3 定性的優位性 vs 定量的優位性 .....	332
9.4 量子計算に対して機械学習は何ができるのだろうか .....	334
参考文献 .....	335
<b>監訳者あとがき</b> .....	<b>337</b>
<b>索引</b> .....	<b>341</b>