

計測・制御  
テクノロジー  
シリーズ  
6

計測自動制御学会 編

# 量子力学的手法による システムと制御

伊丹 哲郎  
松井 伸之 共著  
乾 徳夫  
全 卓樹

コロナ社

---

---

会誌出版委員会（平成 29 年度）

出版ワーキンググループ

主 査 小 木 曾 公 尚  
委 員 天 野 晃  
(五十音順) 倉 本 直 樹  
小 林 洋  
中 荃 隆  
奈 良 高 明  
安 井 裕 司

---

---

# ま え が き

まず、本書のテーマを以下に掲げる。

- 状態空間に広がる波を想定した最適フィードバック制御の量子力学
- ニューラルネットワークに量子的な計算ビットを搭載した量子計算知能
- 確率論に量子的もつれを導入して人間行動を分析する量子意思決定論と量子ゲーム理論
- 量子機械と量子グラフ

本書が主として想定する読者は、「普通の大きさ」すなわち「マクロ」の装置やプラントに関わる技術者/研究者である。身の回りの物質が、原子や分子といった「非常に小さい」すなわち「ミクロ」の物質からできていることは常識として知っているが、機械や熱、流体の力学、電磁気あるいは化学反応を扱うことはあっても「量子」は必要ない、そう考えるエンジニアが対象である。本書はマクロな世界を、ミクロの力学を使って解き明かす方法を提示する。その意味で、本書は量子力学ユーザにその新しい活用の用途を与えることにもなる。

「量子」は、製鉄炉内の温度推定のために輻射エネルギーを離散化するという 19 世紀末（1900 年 12 月）に出されたアイデアに端を発し、ミクロ世界を説明するための基本要素となった。ところが、これをあえてマクロの物理・工学システムのみならず人間行動の分析に適用するという試みが、誕生から 1 世紀を経た 2000 年前後に世界各地で起こった。ミクロの物質は波であり、かつ粒子でもある。この事実を反映して、本書でも繰り返し説明・強調するように、システムの状態とは「重ね合わせ」できるベクトルである。また、複素数に関与するため、システム同士の「干渉」がある。このような一見世離れした論理が、古典的なマクロ物理を確かに内包する。であれば、日常世界の難題をより広い視野で捉えるには、それを量子の言葉で書き直すことが一つの有力な方法

論となるのではないか？ 事実、非線形システムのフィードバック則は、「量子化」により線形理論で最適化できる。複素位相を持つ「量子描像」ニューラルネットワークは、古典的なニューラルネットワークをはるかに超える性能をもたらす。囚人のジレンマには、「量子的」に解決する途が開かれる。

海外では、すでにこの新分野の成書も多い。そこで、本書を企画し、量子力学とはどのようなもので、そのなかが有益なのかを、エンジニアを対象として議論・提供しようと考えた。このようなアイデアを中心にすえた成書は、海外にもない。

**1章**（伊丹）では、粒子は波、波は粒子であり、木から落ちるリンゴの運動はベクトルであると考えざるを得なくなった紆余曲折の経緯をあえて強調する。「より広い視野」で課題を見直す上では、事実には裏づけられている限り「禅問答」も意外と役に立つ。また、この章ではマクロシステムへの適用に焦点を当てつつ、量子力学の基本構造と計算法を示す。読者はその基礎の理解があれば、続く各章を自由な順で読むことができる。

**2章**（伊丹）は、ハミルトン-ヤコビ方程式を媒介として非線形システムのフィードバック最適化を線形理論で扱う。システムの「量子化」により従来の量子力学の計算法が適用できる点を強調する。

**3章**（松井）は、量子計算知能をその誕生から説き起こした上で、量子ビットあるいはエンタングルメント（量子的もつれ）をキーワードとして、量子アルゴリズムをサーベイする。ついで、量子描像ニューラルネットワークによる豊富な適用例を与える。古典ニューラルネットワークに比した大幅な性能向上と、それが量子のどの側面に依拠するかについて、詳細な分析を示す。

以上が工学的な適用であるのに対し、**4章**（全）は量子を人間行動に適用する野心的な試みである。確率の論理を詳述した上で、心理を量子力学的確率で記述することの優位性を強調する。つぎにゲーム理論の量子版を与え、純粋に量子的なナッシュ均衡の存在を強調し、その含意を示す。以上にあつては、実装は古典物理システムであるが、量子システム実装の可能性についても一部で触れる。

最後の**5**章は、マイクロ量子システムとしての設計・製作を前提として、量子機械（乾）と量子グラフ（全）を説明する。書籍で触られることの少ない発展途上の項目であり、研究アイデアを得るためにもぜひ一読されたい。発展著しい「量子情報」について、そのキーとなる概念は量子的もつれであり、これは**3**章および**4**章を通じて詳細な説明がなされている。

量子力学のシステム・制御分野への適用は、海外においてはすでに確固たる潮流である。これをわが国の技術者/研究者に伝える初めての和書として、本書は刊行される。

最後に、**3**章の研究に協力いただいた兵庫県立大学院生の上口大晴氏と峯本俊文氏、松江工業高等専門学校の幸田憲明教授、ならびに兵庫県立大学の磯川梯次郎准教授と西村治彦教授に、また**4**章と**5**章の量子グラフの領域について熟読の上コメントをいただいた高知工科大学院生の中村孝明氏に謝意を表したい。

2017年10月

著 者

# 目 次

## 1. マクロシステムの「量子」的な解析

1.1	日常の世界になぜあえて「量子」を持ち込むのか？	1
1.2	量子力学の基本構成	4
1.2.1	シュレディンガー方程式と波動の解釈	5
1.2.2	固有モードの線形重ね合わせと測定の作業仮説	7
1.2.3	量子力学で記述されるシステム	9
1.3	量子力学的な物理世界	12
1.3.1	正準量子化	12
1.3.2	古典力学との対応	14
1.3.3	集合論的に自明な不等式とその量子力学における破れ	24
1.4	まとめと展望	27
問	題	28

## 2. 最適フィードバック制御の量子力学

2.1	非線形フィードバックの「重ね合わせ原理」による最適化	29
2.1.1	最適フィードバックへの揺らぎの導入	29
2.1.2	非線形制御を包含する線形理論の可能性	35
2.1.3	最適制御としての力学, 力学としての最適制御	37
2.2	ディラック括弧と波動方程式	39
2.2.1	ディラック括弧	39

2.2.2	最適フィードバック制御のシュレディンガー方程式	47
2.2.3	アフィンシステム	48
2.3	最適フィードバックの近似	55
2.3.1	波動関数の経路積分表示	56
2.3.2	定常位相	60
2.4	アルゴリズム	65
2.4.1	制御定数 $H_R$ の置き換え	65
2.4.2	LQ 制御系の適用	70
2.4.3	固有値解析	73
2.4.4	ランダムウォーク	81
2.4.5	開ループ：経路積分とそのモンテカルロ計算	87
2.5	まとめと展望	95
問	題	95

### 3. 量子計算知能

3.1	量子計算知能の誕生	97
3.2	量子計算	99
3.2.1	量子ビット	100
3.2.2	量子レジスタと量子エンタングルメント	101
3.2.3	量子論理ゲートと量子回路	104
3.2.4	量子アルゴリズム	106
3.3	量子描像ニューラルネットワーク	108
3.3.1	ニューロンとニューラルネットワーク	109
3.3.2	量子計算とニューラルネットワーク	113
3.3.3	量子ビットニューラルネットワーク	115
3.3.4	量子ビットニューラルネットワークにおける量子効果	129

3.3.5 応用例での性能評価	133
3.4 まとめと展望	138
問 題	139

## 4. 量子意思決定論と量子ゲーム理論

4.1 量子力学的確率	140
4.1.1 事象の確率的記述と量子力学	140
4.1.2 ベル不等式の破れと局所的隠れた変数理論の否定	144
4.2 量子意思決定論	147
4.2.1 マクロ世界における量子力学的確率?	147
4.2.2 条件付き確率事象としての人の信念	148
4.2.3 中間的与件の量子的記述	149
4.2.4 算術平均, 幾何平均, 量子平均	150
4.2.5 当然原理の破れと連言錯誤	152
4.3 ゲーム理論の基礎	153
4.3.1 ゲーム理論の設定, 利得行列, 効用関数とナッシュ均衡	154
4.3.2 囚人のジレンマとパレート効率性	157
4.3.3 不完備情報ゲームとハーサニイ理論	159
4.4 量子ゲーム理論	162
4.4.1 量子戦略	162
4.4.2 連結確率の非分離性	163
4.4.3 量子的ナッシュ均衡	166
4.4.4 量子的利他性	168
4.4.5 相 関 均 衡	170
4.5 量子的不完備情報ゲーム	172
4.5.1 量子的バイズ-ナッシュ均衡	173

4.5.2 純量子的利得とベルの不等式の破れ	175
4.6 まとめと展望	178
問 題	179

## 5. 量子機械と量子グラフ

5.1 量子アクチュエータ	180
5.1.1 カシミール力で動くマイクロメカニズム	180
5.1.2 光の量子化とカシミール力	181
5.1.3 量子アクチュエータの駆動力と制御	185
5.2 ナノメカニカル共振器	189
5.2.1 機械式共振器の量子ビット	189
5.2.2 量子ビットの制御	194
5.3 カシミール効果によるメカニカル共振器の制御	197
5.3.1 グラフェン共振器	197
5.3.2 カシミール力によるグラフェンの変形	199
5.4 量子グラフ理論とはなにか?	202
5.5 特異点のある直線上の量子力学	203
5.5.1 ハミルトニアン of 自己共役性と流束の保存	203
5.5.2 接続行列と散乱行列	206
5.5.3 デルタポテンシャルとデルタプライムポテンシャル	208
5.5.4 フロップ-筒井型接続	209
5.6 半直線と節点の量子力学	210
5.6.1 最も一般的なユニタリー接続行列	210
5.6.2 散乱行列	212
5.6.3 ユニタリーかつエルミートな散乱行列	213
5.6.4 モデュラ交換対称性とアダマール行列, カンファレンス行列	215

5.6.5	最も一般的な接続条件の実験的实现	217
5.6.6	無反射等透過量子グラフ, 等散乱量子グラフの構成例	218
5.7	量子グラフ理論の応用	220
5.7.1	外線に外場のある量子グラフ	220
5.7.2	無反射端子, 無透過端子を持つ量子グラフと平坦量子フィルタ	221
5.8	まとめと展望	224
問	題	225
引用・参考文献		227
問題解答		234
索引		240

# 1

## マクロシステムの「量子」的な解析

### 1.1 日常の世界になぜあえて「量子」を持ち込むのか？

量子力学は、大きさが  $10^{-10}$  m (0.1 ナノメートル) 程度の「マイクロ」世界の説明理論である。一方で、読者は「普通の大きさ」の世界に住み、普通の大きさの機械やプラント、社会や認知システムあるいは人工知能の設計・研究に従事している。計測の基本となる単位にしても、SIであれば 1 kg, 1 m, そして 1 s と、日常的スケールの値である (1 A はいささか大きすぎるが)。そこではマイクロをあえて考慮する必要はない。また、マイクロを対象とした研究者にあっても、これを日常的なものとしてイメージするほうが理解の助けになる。例えば、分子動力学ユーザにとって、気体とは衝突を繰り返す多くのボールのシステムである、といったように。脳の中の神経回路網が非常に小さなエレメントの集合であるとだれもが思っているが、そこでの信号伝搬は日常的な考えでモデル化できる。本書でいう「マクロ (巨視的)」システムとは、この「日常的なサイズ」の世界のことである。あえてマクロというのは、量子力学の守備範囲であるマイクロ領域と対比するためである。

では、いったいなぜ、マクロシステムの解析・設計にマイクロの量子力学が必要なのだろうか？

さまざまな数学的手法やモデリングあるいは法則性の探索において、日常世界をニュートン力学や熱理論といった、いわば古典的な理論で非常にうまく説明できた成功体験が、逆にわれわれの考えの自由度を限定しているのかもしれ

## 2 1. マクロシステムの「量子」的な解析

ない。その考え方の枠組みをより広くするために「量子」の概念が役立ち、かつ実用上の利益もあるというのが、われわれの主張である。

20世紀の初め、人類は物理世界の「理解の仕方」そのものの転換を余儀なくされた。そして、結果として得られた量子力学という「考え方」が、いまなおマクロにも適用されてしかるべき「概念」を、そして方法論あるいはアルゴリズムを、確かに内包しているのである。量子力学はまだ味わい尽くされていない！では、その量子力学とはどのようなものか？量子力学の典型的な適用対象の一つである原子を例にとりて説明してみよう。読者の中には、周期律表や化学の学習を通じて、原子というものが太陽系のようなシステムであり、重たい核の周りに電子があたかも惑星のごとく回転している、と「絵柄」として理解している人も多いかも。しかし、20世紀初めの原子は実験的にはミニ太陽系であったにもかかわらず、その描像は認めがたかった。原子とはスイカのようなもので、赤身のそこここにある種のように電子が散らばっていたのである。なぜか？電子が惑星のごとく中心（原子核）の周りを回転すると電磁輻射を続ける。すると、電子はいずれ回転エネルギーを使い尽くして核に墜落してしまう。原子を、質量の大部分を持つ核の周りに軽い電子が回るシステムと見るためには

原子の中の電子とは、ドラムヘッドの振動モードのようなものである

と考えざるを得ない。このような発想の口火を切ったのは、製鉄炉内の温度推定の問題であった。正しくスペクトルを説明するには

電磁輻射のエネルギーは離散値しかとれない

としなければならない。これらを体系的に説明するために量子力学が構築される。しかし、そこでは

物理量とは線形演算子（行列）であって、それが作用するベクトルが物理システムの状態なのである

という古典物理とは似ても似つかない理論構成になってしまった。しかも、ルールを追加しなければならない。すなわち、システムを計測すると、連続的に時間変化していたベクトルが一つの固有モードに突然に変化し、対応する固有値が計測値になる。このシステムの連続的な時間変化と状態の突然のジャンプ（波束の収縮）の合体が、量子力学である。いまだに、ジャンプのルールをどう解釈するか議論は尽きない。量子力学を理解している人間は一人もいない<sup>1)</sup>のである。しかしなお、不思議な波束の収縮の考えを含め、量子力学は確かに自然現象を完全に正しく記述する。そして、古典物理をある極限の形態としてその中に含む。

解釈問題はその道の専門家に任せるとして、ここであえて量子力学をマクロシステムに適用する理由が見えてくる。これは大きく二つがある。

- まず、量子物理が古典物理を包含しているという事実に着目したいわば「拡張性」である。マクロ世界の解析が古典物理の法則性に従ってなされるとしても、古典を含む量子の概念を使ってこれを見直すことで、より豊富な内容が得られる可能性がある。
- もう一つは、量子力学が波の理論であることから「線形性」を持つことである。この特徴は計算の並列化の枠組みの中で、すでに10~20年前から「量子計算」、「量子情報」として活用が試みられている。われわれもその線形性、計算並列化を量子計算、量子情報とは別の観点から活用する。

以上の拡張性・線形性をうまく使えば、量子力学はマクロであれなんであれ、その考え方を適用できるのではあるまいか？ さらに、量子力学を理解している人間は一人もいないというのなら、（その対偶をとるわけにはいかないが）逆にだれ一人理解していない日常世界のさまざまな現象があれば、それを「量子力学的」に分析するという道があってもよいのではないか？

そして、このような観点に基づいて、海外ではすでに量子の概念を例えば認知科学においても導入しようという潮流<sup>2)~5)</sup>が起りつつある。そこで、

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

本書では日本発のアイデアを中心に、この潮流を紹介する。概要は表 1.1 に示すとおりである。

表 1.1 量子の対象と潮流

対象	枠組み (基礎理論)	拡張のための 量子的な概念	目的	章
最適フィードバック制御	ハミルトン-ヤコビ理論	状態空間に広がる波	量子力学計算ツールの活用	2
人工知能 (計算知能)	ニューラルネットワーク	量子的な計算ビット	量子描像による性能向上	3
人間行動の科学	確率論	量子的もつれと位相	人間心理, 社会性の説明	4

なお、学習の便宜のため、参考となる入手しやすい日本語 (翻訳含む) の教科書をここで列記しておく。

- 量子力学全般：『岩波基礎物理シリーズ/量子力学』<sup>6)</sup>
- 制御関係：『入門現代制御理論』<sup>7)</sup>
- ニューラルネットワークなど：『複素ニューラルネットワーク 第2版』<sup>8)</sup>
- ゲーム理論：『ゲーム理論新版』<sup>9)</sup>
- 量子機械：『現代の量子力学 (下)』<sup>10)</sup>
- 量子グラフ：『量子力学の基礎』<sup>11)</sup>

## 1.2 量子力学の基本構成

まず、1.2.1 項では、量子力学の歴史を簡単に振り返りつつシュレディンガー方程式 (1926 年) に至った背景<sup>12)</sup> を示す。これは、物質に随伴した波動とはいったいなにか? を解釈付けていく過程でもある。1.2.2 項で見るとおり、波動関数の固有モードへの分解を通して、その波動とは固有モード出現の確率を表す量である、とする考え方が出てくる。この確率波の導入により、ミクロ現象をすべて説明できる。ここに、実用の計算アルゴリズム<sup>13)</sup> としての量子力学が確立された。1.2.3 項では、調和振動子を例として[1]でシュレディンガー

方程式による固有エネルギー計算法を、また〔2〕で固有モードが出現する確率の計算をスピン  $\frac{1}{2}$  の系を例にとり説明する。

### 1.2.1 シュレディンガー方程式と波動の解釈

19世紀末、ドイツ物理学は産業と一体となり、特に製鉄技術の核となる炉内温度の推定のために輻射エネルギーの分析が課題となっていた。炉内輻射を理想化した黒体輻射のエネルギー強度のスペクトルは、振動数  $\nu$  の低い領域では電磁場の古典波動描像に基づいた  $\sim \nu^2$  (レイリー-ジーンズの公式) により、一方、高振動数では現象論的に得られた指数関数的な減衰 (ウイーンの公式) により実験結果と合わされていた。この状況でプランクは全振動数にわたるフィッティング式を提出した。振動数  $\nu$  の電磁場が定数  $h = 6.6261 \times 10^{-34}$  J·s を単位として

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

を塊とする離散的なエネルギーを持つとすれば、フィッティング式を統計力学的に導出できることを、彼は見出した (1900年)。

この量子仮説 (1.1) は、アインシュタインによって光電効果の説明に積極的に利用された (1905年)。同時期に、当時の最先端物理である原子系物理において物理量が離散値をとるという特徴がはっきり見えてきていた。ボーアは孤立系として対処の容易な水素原子に焦点を定め、プランク定数  $h$  を導入することで、その光スペクトルを説明した (1913年)。しかし、それはニュートン力学とも電気力学とも矛盾する完全な現象論であり、しかも内容の理解しにくい代数的なものであった。

この状況の中に、フランス貴族にして物理学の常識に従うなんの理由も知識も持たず、しかし兵役を経て電気通信の実務への感覚を修養してきたド・ブロイが登場した。光が粒子のようなエネルギーの塊であるなら、運動量  $p$  の物質にも波長  $\lambda$  の波が付随しておかしくはないと、彼は発想した (1924年)。運動量  $p$  の粒子は、次式で決まる波長  $\lambda$  の波でもある。

# 索引

<b>【あ】</b>			
アインシュタイン	144	121, 124, 130	
アスペ	147	確率振幅	100
アダマール	215-217, 219	確率波	4
アダマール変換	105	確率分布	141-143
アフィンシステム	48	隠れた変数	141, 144, 145, 147
<b>【い】</b>		重ね合わせ	99
意識理論	98	重ね合わせ原理	36
位相	142, 143, 149, 151, 162, 167, 174, 218	カシミール効果	180
位相操作	105	活動電位	110
位相反転操作部	132	カーネマン	153
位相変換ゲート	116	カラー画像圧縮復元問題	133
一般化シュレディンガー方程式	40	干渉	142, 143, 152, 167, 178, 223
<b>【え】</b>		観測	141-143, 145, 146, 177
エージェント	148-151	カンファレンス行列	215-218
エックルス-バック理論	98	<b>【き】</b>	
エルミート	205, 212, 214, 215, 217, 224	基本量子論理ゲート	104
<b>【か】</b>		逆散乱	203, 214
解析力学	36	強化学習	112
階層型ニューラルネットワーク	111	教師あり学習	112
ワーク	111	教師なし学習	112
回転ゲート演算	116	<b>【く】</b>	
ガウス積分	61	空間境界条件	68
可逆論理ゲート	99	グラフエン共振器	197
拡散	81	<b>【け】</b>	
学習過程	111	計算基底	100
確率解釈	97, 99, 100,	経路積分	12
		決定論	141, 144, 145
		ケットベクトル	100
		<b>【こ】</b>	
		コインフリップ	162
		交換関係	13
		更新則	111
		拘束力学	40
		効用関数	154, 156, 160, 164, 166, 167, 169, 177
		誤差逆伝播ニューラルネットワーク	111
		古典ビット	100
		古典力学	12
		固有値方程式	9
		<b>【さ】</b>	
		散乱行列	206, 207, 212-215, 218, 219, 221
		<b>【し】</b>	
		しきい値	110, 203, 223
		軸索	110
		シグモイド関数	111
		自己共役	203, 210
		自己組織化ネットワーク	112
		自己符号化器	133
		実数値階層型ニューラルネットワーク	123
		自動運転	108
		シナプス結合	110
		シナプス結合荷重パラメータ	111
		集合論的に自明な不等式	24
		収縮	141, 142
		囚人のジレンマ	158, 159,

161, 162, 167, 170  
 自由接続 217  
 樹状突起 110  
 シュレディンガー方程式 4  
 状態フィードバック 54  
 状態方程式 38  
 ジョセフソン接合 191  
 人工知能 108  
 深層学習 97, 134

【す】

スピン 142-144, 146, 147, 163, 172, 177  
 スピン  $\frac{1}{2}$  5

【せ】

制御定数  $H_R$  47  
 制御 NOT ゲート演算 117  
 正準運動量 13  
 正準量子化 12  
 接続行列 204, 208, 210, 214, 219  
 セレセータ 146, 177, 179

【そ】

相関演算子 164  
 相関均衡 171  
 相互結合型ニューラルネットワーク 111  
 相補性 141  
 測定の作業仮説 9

【た】

対応原理 14  
 対称化の演算 47  
 対流 81  
 多状態操作 104

【ち】

超伝導 190

【つ】

追加コスト 30

【て】

定常位相条件 55  
 定常最適制御 71  
 デイラック括弧 43  
 デルタ型 208, 212, 217, 218  
 デルタプライム型 208, 209, 212  
 テンソル積 103

【と】

当然原理 152, 162  
 トンネル効果 12

【な】

ナッシュ均衡 155-158, 166, 167, 169, 170, 173  
 ナノメカニカル共振器 180

【に】

二重スリットによる干渉 12  
 入力の最適性条件 43  
 ニューラルネットワーク 109  
 ニューロン 109

【の】

ノイマン 149, 162

【は】

排他的論理和 (XOR) 105  
 バインディング問題 113  
 ハーサニイ 160, 161, 173  
 パーセプトロン 111  
 発火状態 115  
 波動関数 99  
 —の固有モード 4  
 波動方程式 97  
 ハミルトニアン 7, 203, 210  
 ハミルトニアン演算子 8  
 ハミルトン原理 37  
 ハミルトン-ヤコビ方程式 40  
 —の一般化 54  
 パレート効率 158, 159,

167, 170

【ひ】

微小管 98  
 非線形最適フィードバック制御 37  
 ヒルベルト 162, 164, 173  
 ヒルベルト空間 100

【ふ】

不確定性原理 6  
 不完備情報 160, 161, 173, 175, 178  
 複素関数表示 116  
 複素数値化 130  
 複素数値ニューラルネットワーク 123  
 複素数値ニューロンモデル 124  
 物質波 6  
 ブラケットベクトル記法 100  
 ブラベクトル 100  
 ブランク定数 5  
 フロップ-筒井型 203, 210, 214, 217, 218, 221, 223  
 プロットホ球 100  
 分岐 81

【へ】

バイズ-ナッシュ均衡 160, 161, 175-177  
 ベル 24, 144, 146, 147, 173, 177

【ほ】

ポアソン括弧 13  
 —の交換関係への置き換え 14  
 ホジキン-ハクスレー回路 110  
 補助変数 39  
 ホップフィールドネットワーク 111  
 ボーム 144  
 ボルツマン因子 91

ボルツマン分布	87	ランダムウォーク	81	量子ニューラルネットワーク	99
ボルツマンマシン	111			量子ニューロコンピューティング	113
<b>【ま】</b>		<b>【り】</b>		量子脳力学理論	98
膜電位	110	利他性	167, 169, 170	量子バイオロジー	98
<b>【む】</b>		リッカチ方程式	65	量子ビット	100
無反射	203, 215, 219, 221	流束	203, 204, 211	量子ビットニューラルネットワーク	123
<b>【め】</b>		量子誤り補正	104	量子ビットニューロンモデル	115
メトロポリス法	90	量子アルゴリズム	98	量子描像ニューラルネットワーク	99
<b>【も】</b>		量子エンタングルメント効果	132	量子フィルタ	221
もつれ状態 (エンタングルメント)	106	量子回路	99	量子並列計算	99
モンテカルロ法	87	量子回路対応ネットワーク	121	量子ポテンシャル	12
<b>【ゆ】</b>		量子重ね合わせ状態	130	量子力学の観測問題	98
有効理論	140, 147, 173	量子機械	180	量子論理回路	104
ユニタリー	210, 214, 215, 217, 224	量子機械学習	97		
ユニタリー行列	105	量子計算	99	<b>【れ】</b>	
ユニタリー変換	99	量子計算知能	97	連結確率	143, 146, 149, 151, 152, 164, 165, 172-174, 176
<b>【よ】</b>		量子計算導入効果	130	連言錯誤	153
与件	148-153	量子検索アルゴリズム	98, 106		
弱い等式	41	量子コンピュータ	97	<b>【ろ】</b>	
<b>【ら】</b>		量子生物学	98	論理回路	104
ラグランジュ未定乗数	41	量子チューリングマシン	99		
		量子的もつれ	99, 143, 144, 162-165, 171, 172, 174		
		量子的もつれ状態 (量子エンタングルメント)	103, 118, 130		
		量子的粒子群最適化法	99		
		量子転送	104		

<b>【英字】</b>		NOT ゲート	104	1 量子ビットのユニタリー変換ゲート	104
AI ビジネス	108	<i>psips</i>	81	2 項積	104
AND ゲート	104	Qubit NN	123	2 状態量子系	100
c 数ハミルトニアン	58	Real-valued NN	123	2 量子ビットの制御 NOT ゲート	104
Complex-valued NN	123			3 ビット量子回路	117
n ビット符号問題	123	<b>【数字】</b>			
NAND ゲート	104	1 エポック	126		

—— 著者略歴 ——

伊丹 哲郎 (いたみ てつろう)

1975年 京都大学理学部物理学科卒業  
1977年 京都大学大学院工学研究科修士課程  
修了 (原子核工学専攻)  
1980年 京都大学大学院工学研究科博士課程  
単位取得退学 (原子核工学専攻)  
1980年 京都大学研究員  
1982年 バブコック日立株式会社勤務  
2003年 博士 (工学) (大阪大学)  
2005年 大阪大学特別研究員  
2009年 広島国際大学教授  
2015年 福岡県ロボット産業振興会議

松井 伸之 (まつい のぶゆき)

1975年 京都大学理学部物理学科卒業  
1977年 京都大学大学院工学研究科修士課程  
修了 (原子核工学専攻)  
1980年 京都大学大学院工学研究科博士課程  
修了 (原子核工学専攻)  
工学博士  
1984年 近畿大学助手  
1987年 近畿大学講師  
1993年 姫路工業大学助教授  
1998年 姫路工業大学教授  
2004年 兵庫県立大学教授  
2017年 兵庫県立大学名誉教授・特任教授  
現在に至る

乾 徳夫 (いぬい のりお)

1990年 関西学院大学理学部物理学科卒業  
1992年 神戸大学大学院理学研究科修士課程  
修了 (地球科学専攻)  
1995年 東北大学大学院情報科学研究科博士  
課程修了 (イメージ解析学専攻)  
博士 (情報科学)  
1995年 姫路工業大学助手  
2001年 姫路工業大学講師  
2003年 姫路工業大学助教授  
2004年 兵庫県立大学助教授  
2007年 兵庫県立大学准教授  
現在に至る

全 卓樹 (ぜん たくじゅ)

1980年 東京大学理学部物理学科卒業  
1982年 東京大学大学院理学系研究科修士課程  
修了 (物理学専攻)  
1985年 東京大学大学院理学系研究科博士課程  
修了 (物理学専攻)  
理学博士  
1985年 ミシガン州立大学研究員  
1986年 ジョージア大学客員助教授  
1987年 メリーランド大学研究員  
1990年 法政大学助手  
1997年 高知工科大学助教授  
2006年 高知工科大学教授  
現在に至る

# 量子力学的手法によるシステムと制御

Quantum pictures in systems and optimal control

© 公益社団法人 計測自動制御学会 2017

2017年12月27日 初版第1刷発行

検印省略

編者 公益社団法人  
計測自動制御学会  
著者 伊丹哲郎  
松井伸之  
乾徳夫  
全卓樹  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 三美印刷株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-03356-4 C3353 Printed in Japan

(新宅) G



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。