

きる符号としては、1960年にRS符号⁽⁷⁾とBCH符号^{(8),(9)}が発明された。なお、リード(Reed)とソロモン(Solomon)によるRS符号の発表の1年後にRS符号は有本によっても独立に発明された⁽¹⁰⁾。また、ブロック符号とは異なる符号化法として、畳込み符号が1955年にエリアス(Elias)によって発明され⁽¹¹⁾、効率的な復号法が1967年にビタビ(Viterbi)によって発明された⁽¹²⁾。1980年代に入り、RS符号が実用化され、誤り訂正符号は情報伝送に不可欠なものとなった。1990年代には、符号長の長い畳込み符号の新構成法と効率的な復号法によるTurbo符号⁽¹³⁾が発明されるとともに、ギャラガー(Gallager)が発見したLDPC符号⁽¹⁴⁾が再発見され、効率的な反復復号法が発明された。これらの復号法は、符号長に比例する計算量で復号が可能であり、通信路容量に漸近する性能が達成できるため、実用化や標準化に供されている。

1.1.4 ひずみを許容した情報源符号化

シャノンは、アナログ信号の量子化の問題についても取扱い、アナログ信号の量子化ビット数と量子化によって生じるひずみのトレードオフ関係を明らかにし、許容されるひずみによって定まる量子化ビット数の限界がレートひずみ関数で与えられることを示した^{(1),(15)}。1950年代半ばになると、計算機を用いた量子化器の設計法であるロイド(Lloyd)アルゴリズム⁽¹⁶⁾やマックス(Max)アルゴリズム⁽¹⁷⁾が発明された(なお、論文⁽¹⁶⁾は1957年頃書かれたが、発表されたのは1982年である)。その後、ベクトル量子化器の効率的な設計法であるLBGアルゴリズム⁽¹⁸⁾の発明とともにひずみを許容した情報源符号化は実用の域に達した。

1.1.5 多端子情報理論

1973年にスレピアン(Slepian)とウルフ(Wolf)⁽¹⁹⁾は、相関を有する二つの情報源からの出力系列を互いに独立に符号化し、受信者が双方の出力系列を復号するために二つの符号化率の満足すべき領域を求めることに成功し、条件付きエントロピーに対して工学的な意味付けをした。一方、1971年にアールスウェーデ(Ahlsvede)⁽²⁰⁾は、二人の送信者が独立にメッセージを符号化して通信路に送り、受信者が双方のメッセージを復号できるように二つの伝送速度の満足すべき領域を求め、条件付き相互情報量に対しても工学的な意味付けを

した。この二つの発見以降、複数の送受信者を有する情報源や通信路の符号化問題である多端子情報理論が活発に研究されるようになった。

参考文献

- (1) C.E. Shannon, "A mathematical theory of communication," Bell System Technical Journal, vol. 27, pp. 379-423, 623-656, 1948.
- (2) D.A. Huffman, "A method for the construction of minimum redundancy codes," Proc. IRE, vol. 40, pp. 1098-1101, 1952.
- (3) J. Rissanen, "Generalized Kraft inequality and arithmetic coding," IBM J. Res. Devel., vol. 20, pp. 198-203, 1976.
- (4) J. Ziv and A. Lempel, "A universal algorithm for sequential data compression," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-23, pp. 337-343, 1977.
- (5) J. Ziv and A. Lempel, "Compression of individual sequences via variable rate coding," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-24, pp. 530-536, 1978.
- (6) R.W. Hamming, "Error detecting and error correcting codes," Bell System Technical Journal, vol. 29, pp. 147-160, 1950.
- (7) I.S. Reed and G. Solomon, "Polynomial codes over certain finite fields," SIAM J. Appl. Math., vol. 8, pp. 300-304, June 1960.
- (8) A. Hocquenghem, "Codes correcteurs d'erreurs," Chiffres, vol. 2, pp. 147-156, 1959.
- (9) R.C. Bose and D.K. Ray-Chaudhuri, "On a class of error correcting binary group codes," Inform. Control, vol. 3, pp. 68-79, March 1960.
- (10) 有本 卓, "p元群符号系の符号化, 復号法と誤りの訂正機構," 情報処理, vol. 2, no. 6, pp. 320-325, 1961.
- (11) P. Elias, "Coding for noisy channels," IRE Conv. Rec., vol. 3, Part 4, pp. 37-46, 1955.
- (12) A.J. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-13, pp. 260-269, April 1967.
- (13) C. Berrou and A. Glaviuex, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo codes," IEEE Trans. Comm., vol. 44, no. 10, pp. 1261-1271, Oct. 1996.
- (14) R.G. Gallager, "Low-density parity-check codes," IRE Trans. Inform. Theory, vol. IT-8, pp. 21-28, Jan. 1962.
- (15) C.E. Shannon, "Coding theorems for a discrete information sources," IRE Nat. Conv. Rec., part 4, pp. 142-163, 1959.
- (16) S.P. Lloyd, "Linear squares quantization in PCM," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 28, pp. 129-

137, 1982.

- (17) J. Max, "Quantizing for minimum distortion," IRE Trans. Inform. Theory, vol. IT-6, pp. 7-12, March 1960.
- (18) Y. Linde, A. Buzo, and R.M. Gray, "An algorithm for vector quantization design," IEEE Trans. Comm., vol. 28, no. 1, pp. 84-95, Jan. 1980.

1.2 システム数理と応用

内平直志(北陸先端大)

一般に、「システム数理」には、線形システム、連続システム、離散システム、確率システムの数理など広範な研究領域が含まれるが、本節における「システム数理」は、離散事象システムを起点に発展してきた数理的なモデル化に基づき、システム的设计・解析・検証・制御を行うための理論および手法を対象とし、その歴史的な経緯と最新の研究課題について述べる。

1.2.1 離散事象システムの数理モデル

離散事象システム(discrete event system)とは、離散的に生起する事象をトリガーとして状態が変化するシステムの総称である。プラントや組み込みシステム、更に人間系を含むサービスシステムなど多くの対象が離散事象システムとして取り扱うことができる。最も基本的な離散事象システムのモデルは、状態遷移図(state transition diagram)であり、数理モデルとしては有限オートマトン(finite automaton)として定式化され、解析手法が開発された。有限オートマトンは、逐次の処理のモデルであるが、現実の離散事象システムには並行性を持つものが多く、並行性を記述できるように拡張したモデルとして、ペトリネット(Petri net)、ステートチャート(Statechart)、I/Oオートマトン(I/O automata)、CCS(Calculus of Communicating Systems)やCSP(Communicating Sequential Processes)に代表されるプロセス代数(Process Algebra)など多くのモデルが提案された。その中で、ペトリ(Petri)によって1962年に提案されたペトリネットは、シーケンス制御プログラムやワークフロー記述言語の数理モデル

- (19) D. Slepian and J. Wolf, "Noiseless coding of correlated information sources," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-19, no. 4, pp. 471-480, 1973.
- (20) R. Ahlsvede, "Multi-way communication channels," Proc. 2nd Int. Symp. Inform. Theory, pp. 23-52, 1971.

として理論・応用の両面で研究が活発に行われてきた。また、ステートチャートは、オブジェクト指向に基づく統一モデリング言語UML(Unified Modeling Language)の状態遷移記述用チャートとして発展し、システム開発やソフトウェア開発の標準的なモデリング言語として広く普及している。離散事象システムの制御の数理モデルとしては、スーパーバイザ制御(supervisory control)がある。制御が不可能な事象を含む離散事象システムにおいて、与えられた仕様を満たすように制御するための理論的枠組みを提供している。離散事象システムの検証に関しては、時間論理(temporal logic)で記述された仕様を離散事象システムが満たすか否かを判定するモデル検査法(model checking)がある。これは、システムの全ての状態を網羅的に洗い出し検証を行う手法であり、状態空間の爆発が課題であったが、効率的な検証アルゴリズムの研究が大きく進展し、ハードウェア及びソフトウェアの検証ツールとして実用化が進んでいる。近年では、離散事象制御に連続制御の要素を組み込んだハイブリッドシステムの数理モデルの研究が進んでおり、時間オートマトン、時間・確率ペトリネット、ハイブリッドオートマトンなどが提案されている。

1.2.2 システム数理と応用の発展

並行性を記述できる離散事象システムの数理モデルの研究は古くから行われていたが、我が国の産業界で並行/並列/分散システムが様々な分野で幅広く使われ、多くの研究者・技術者が工学的に注目し始めたのは1980年代からであろう。1994年に発足したコンカレント工学研究専門委員会の設立趣旨書には、「分散協調システム、自律分散システム、グループウェアなどの非手続き型人間-機械系システムのコンカレントモデリング、並

行・非同期・協調動作解析、性能評価及びその実現手法を系統的に研究し、人間を含む分散非同期システムの効率的でオープンな戦略的運用を可能とするコンカレント制御機構を追求することにより、無集中管理を念頭に置いた知的自律、個の相互通信による協調や柔軟なシステム統合といった将来の重要な工学的課題にアプローチするとある。当時は、分散事象システムのモデリング・設計・検証・評価において最大の課題は「並行性」の取扱いであった。

しかし、2000年代に入ると理論及び技術の進歩により、「並行性」の取扱いもコモデティ化してきた。すなわち、並行性の理論的構造は明らかになったが、分散事象システムの課題が、並行性を含む「大規模・複雑・オープン性」にシフトしてきたと言える。ここで、「大規模で複雑なオープンシステム」に関する社会や産業界の変化点には下記のようなものがある。

- ① あらゆるモノがインターネットで相互につながるIoT (Internet of Things) 時代の到来
- ② クラウドコンピューティングの普及・拡大及びクラウド上に集積された膨大かつ多様な情報や知識の統合と利用の可能性の増大
- ③ 少子高齢化時代における医療・介護サービスなど人間系を含むシステムの効率化への期待
- ④ 社会基盤として必要不可欠となったソフトウェアシステムの安全・安心に関する要求増大

これらの社会や産業界の大きな変化に対して、従来の並行性を含む分散事象システムの数理モデルに必要な拡張として、分散系と連続系を含むサイバーフィジカルシステムの数理モデル、人間系を含むシステムの数理モデル

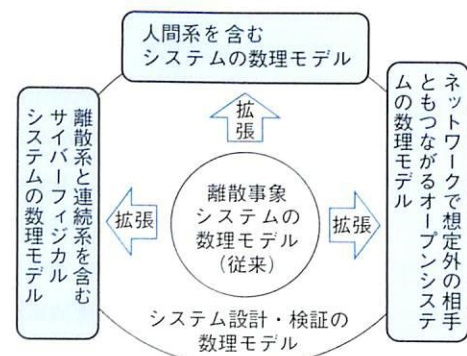


図 2.1 分散事象システムを起点に今後必要な数理モデル

ル、ネットワークで想定外の相手ともつながるオープンシステムの数理モデルの研究がある。また、これらのシステムにおいて、安全・安心を実現する設計・検証の数理モデルは共通の課題である (図 2.1)。

1.2.3 システム数理と応用の最新動向

前述の研究課題に関する変化点や課題に対応する最新の研究動向を紹介する。

(1) サイバーフィジカルシステムの数理

IoT 社会で様々なセンサや機器がネットワークでクラウドにつながるサイバーフィジカルシステムは、「つながる工場」に代表されるように産業・社会の重要な基盤になりつつある。サイバーフィジカルシステムの数理モデルの一つとしてハイブリッドシステムの展開が期待されており、カリフォルニア大学バークレー校の Ptolemy プロジェクト¹²⁾などで活発に研究されている。更に、モノがつながることで得られた膨大なデータ (ビッグデータ) を分析・最適化し、社会 (交通、エネルギー、ヘルスケアなど) や産業のムリ・ムダ・ムラを排除する「つながる世界」の制御システムでは、狭義のハイブリッドシステムのモデルとビッグデータの学習・最適化のモデルの統合が必要になっている。

(2) ヒューマンファクタの数理

医療、介護、接客、飲食、保守、警備などのサービスの生産性の向上が求められている。これらの人間系を含む分散事象システムのモデル化、設計支援、検証は重要な課題であり、従来のオペレーションズリサーチに加え、人間の特性も取り込んだ数理モデルが、サービス科学の重要な領域として発展しつつある。具体的には、人間の行動をハイブリッドシステムとしてモデル化する研究¹³⁾や、人間系を含むサービスシステムをマルチエージェントシステムとしてモデル化し、解析する研究が活発に行われている。

(3) オープンシステムの数理

計算機能力の大幅な向上により、分散事象システムの数理モデルに基づく大規模で複雑なシステムの設計・検証支援が実用的になってきた。今後は、ネットワークで様々なシステムが繋がったシステム・オブ・システムが設計や検証が対象になってくる。特に、自動運転システムでも懸念されているように、システムがどのようなシステムとつながるかは事前に限定できないオープンシ

ステムの検証は、大きな課題である。このような設計時に想定していない状況に対しても致命的な状況に陥ることなく、しなやかに対応するためのオープンシステム・デペンダビリティ¹⁴⁾やレジリエンス工学¹⁵⁾における数理モデルは、今後ますます注目されてくるであろう。

参考文献

- (1) N. Uchihira, "Future Direction and Roadmap of Concurrent System Technology," IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E90-A, no. 11, pp. 2443-2448, 2007.
- (2) P. Derler, E.A. Lee, and A.S. Vincentelli, "Modeling cyber-physical systems," Proc. of the IEEE, vol. 100, no. 1, pp. 13-28, 2012.
- (3) 鈴木達也, 井村順一, "ハイブリッドシステムとして捉える人間行動モデル," 計測制御, vol. 45, no. 12, pp. 1055-1061, 2006.
- (4) M. Tokoro (ed.), Open systems dependability: dependability engineering for ever-changing systems (Second Edition). CRC press, 2015.
- (5) E. Hollnagel, Safety-I and safety-II: the past and future of safety management, Ashgate Publishing, 2014.

1.3 視覚情報処理

高田 英明 (NTT)

人間とマシンとの最適なインタフェースを実現するには、人間の生理的・心理的特性を知ることが重要である。例えばディスプレイの分野においては、実世界から受ける刺激と人工的に作り出された刺激が視覚系に及ぼす違いに十分に注意を払う必要がある。ただ、現実には実世界と同等の刺激を人間に提示することは困難であり、目的に合わせて可能な限り人間の特性に適合した表示方式を検討することで対処していくこととなる。

本節では、人間の視覚心理の知見を活用することで大きく進化し実用化に結びついた技術を例に、視覚情報処理に関する研究の歴史について述べる。

1.3.1 人間の視覚系による空間知覚

人間の眼は、実世界の情報を二次元の網膜上に投影している。視覚系は、網膜に投影された網膜像と眼球の動きなどの生理的な情報を手掛かりに実世界の三次元構造を脳内で空間的に知覚するものであると考えられる。しかし、実世界の情報を目だけで完全に取得することは難しい。そのため、人間は実世界の三次元構造に対して様々な仮定を設けることで、不完全な情報から実世界を推定し知覚していることになる。視覚系が用いている仮定が実世界と異なっている場合には、実世界とは異なって知覚される錯視¹⁾が生じることとなる。

目から得られる多くの情報の中でも、特に奥行き方向

の情報は網膜上では完全に失われている。人間は実世界の三次元空間を知覚するために、人間の目の物理的な機能である両眼視差・輻輳・焦点調節・運動視差などの生理的要因 (図 2.2)、経験や学習から得た陰影や大きさの恒常性などによる心理的要因 (図 2.3) など多くの手

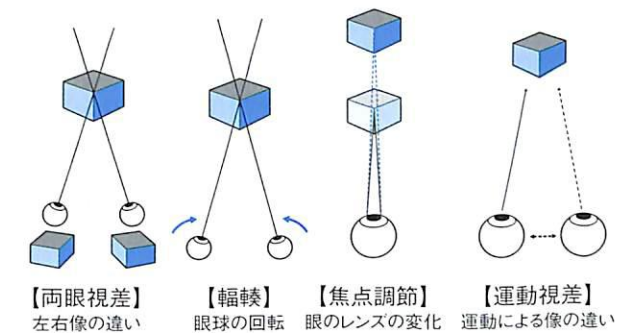


図 2.2 奥行き知覚の生理的要因

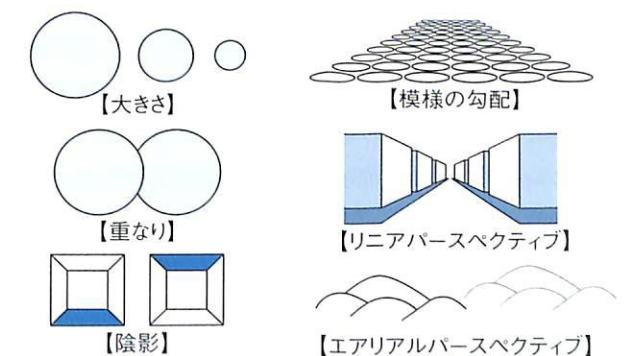


図 2.3 奥行き知覚の心理的要因

電子情報通信学会 100 年史

(創立 100 周年記念出版)



2017 年 9 月

EIC

一般社団法人 電子情報通信学会