つながる！ 基礎技術

IoT 入門

コンピュータ・ネットワーク・データの基礎から開発まで

博士（工学） 渡辺 晴美
博士（情報科学） 今村 誠【編著】
博士（工学） 久住 憲嗣

コロナ社

編著者・執筆者一覧

【編著者】

渡辺（わたなべ）　晴美（はるみ）（東海大学 情報通信学部 組込みソフトウェア工学科）　0，4 章

今村（いまむら）　誠（まこと）（東海大学 情報通信学部 組込みソフトウェア工学科）　5 章

久住（ひさずみ）　憲嗣（けんじ）（九州大学 工学部 電気情報工学科）　10 章

【執筆者】（50 音順）

石田（いしだ）　繁巳（しげみ）（九州大学 大学院システム情報科学研究院）　1 章

大川（おおかわ）　猛（たけし）（東海大学 情報通信学部 組込みソフトウェア工学科）　3 章

小倉（おぐら）　信彦（のぶひこ）（東京都市大学 メディア情報学部 情報システム学科）　6 章

汐月（しおつき）　哲夫（てつお）（東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科）　7，8 章

菅谷（すがや）みどり（芝浦工業大学 工学部 情報工学科）　11 章

松浦佐江子（まつうらさえこ）（芝浦工業大学 システム理工学部 電子情報システム学科）　9 章

松原（まつばら）　豊（ゆたか）（名古屋大学 大学院情報学研究科 情報システム学専攻）　2 章

三輪（みわ）　昌史（まさふみ）（徳島大学 大学院社会産業理工学研究部）　12 章

元木（もとき）　誠（まこと）（関東学院大学 理工学部 理工学科 情報ネット・メディアコース）　7，8 章

（所属は 2019 年 11 月現在）

ま　え　が　き

この本を手にとった皆さんはIoTという言葉を一度は耳にしていることだろう。IoTはInternet of Things，すなわちモノのインターネットの略であるが，わかりにくいという印象を持つ方もいらっしゃるだろう。さらに，関連技術は急速に広がりさまざまな用途で使われるようになったため，その定義も曖昧である。とはいえ，「モノとモノがネットワークでつながり，サービスを提供するシステム」という意味を持つことは，広く共有されているように思われる。

われわれの生活はすでにIoTに囲まれている。例えば，最近の天気予報は，人工衛星画像を気象予報士が分析するだけではない。人工衛星画像や百葉箱に加え，街頭に設置されているセンサ，スマートフォンのお天気アプリ，SNSから得た情報を得て，総合的に判断し，天気予報となる。この例の場合，「モノのインターネット」の「モノ」にあたるのが，人工衛星，百葉箱，センサ，お天気アプリであり，これらがインターネットでつながり，一つのサービスである天気予報となる。このように複数のモノがつながりサービスを提供するシステムがIoTである。

IoTなどの情報通信技術が進化するスピードは速く，その進化とともに，ディジタルトランスフォーメーション等のさまざまな言葉が日々登場する。IoTも，すぐに廃れる言葉と言われることもあるが，その登場は意外と古く1999年である。また，IoTという言葉はシンプルゆえに新たな技術の中心的な意味をなしている。

IoTが普及した現在，それ以前とは明らかに異なるサービスを，われわれは情報通信技術から得るようになった。スマートフォンとSNSの普及に伴い，爆発的につながることでのサービスが多様化した。例えば，天気予報，交通情報等の従来からあるサービスの質の向上に加え，仮想通貨などの新たなサービスが登場した。IoTが登場する前の情報通信技術は，人の仕事の代わりを担い，効率的に作業することが目的だった。IoTの登場により，モノの使われ方が把握できるようになり，人の生活を豊かにすることを目指すようになった。

さらに，この変化により，情報通信技術を構築するために学ぶべき学問も変化しつつある。したがって，IoTというキーワードは消え失せる可能性があるにしても，そのキーワードを中心に学習を進めることの意義は大きい。IoTを構築するためには，基礎となる学問分野を理解する必要がある。名前のとおり，まずはインターネットとモノの技術ということになるが，それではサービスを生み出すことはできない。また，モノは多様で複雑であり，学問分野は多岐にわたる。IoTの特徴として，「つながる」，「サービス」が際立っていることから，ネットワークやサービスに議論が集中しがちではあるが，他の分野も同程度に重要で

ある。

述べるまでもないが，関連あるすべての分野を理解することは困難である。実際，一つの製品には，さまざまな分野の専門家が多数携わり協力して開発が行われる。また，専門としている分野のみの知識ではつなげることは難しい。そこで，T 型，すなわちシステム全体を見通せる横断的で広い知識，軸となる専門分野を身につけることが理想的であるが，「なにをどこまで」学習するのかということが問題となる。その点に対し，われわれは，大学の実験や卒業研究でつくることのできる技術に着目し，モノづくり教育を実践している教員で，本書を執筆した。

したがって，本書のテーマは「IoT をつくるために考える」であり，各章は，その視点から IoT を構成する技術や，つくり方に関する技術について紹介する。各章のはじめに，キーワードをあげているので，その章でどのようなことを学ぶのかについて注意して読み進めてほしい。本書で学べる内容は，IoT を構成する技術を学ぶための第一歩にすぎない。今後，各分野を深掘りし，さらにもう一つの分野を探求し，T 型すなわち「広い知識＋軸となる専門の知識」を身につけてほしい。

なお，本書に掲載しきれなかった章末問題解答（補足）や実験教材などをコロナ社 Web サイト（https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339029000/）に掲載した。ご活用ください。

2019 年 11 月

執筆者を代表して　渡辺　晴美

注 1　本書で使用している会社名，製品名は，一般に各社の商標または登録商標です。本書では®と™は明記していません。

注 2　本書で紹介している URL は 2019 年 11 月現在のものです。

目　　次

0. 身近で新しいIoT

0.1　身の回りのIoT……1
0.2　IoT　と　は……3
0.3　IoT　と　ICT……4
0.4　IoT　時　代……5
0.5　知っておきたいICTとIoTの用語……6
　0.5.1　ICTが目指す社会を表す用語……6
　0.5.2　IoTと関連した用語……7
0.6　IoT をつくる……8
コラム：技術の積み上げ……10
章　末　問　題……11

第1部：ネットワークとモノ

1. ネットワーク

1.1　通信とネットワーク……12
1.2　IoTとインターネット……13
1.3　プ ロ ト コ ル……15
1.4　ト ポ ロ ジ ー……16
1.5　ネットワークアーキテクチャ……17
1.6　代表的な通信規格・プロトコル……19
1.7　IoT機器におけるネットワークの利用……22
コラム：インターネットと通信障害……22
章　末　問　題……23

2. セキュリティ

2.1　セキュリティの課題……24
2.2　セキュリティとはなにか？……24
2.3　IoTにおけるセキュリティ……26

2.4 IoT 機器のセキュリティの課題 …… 29
2.5 IoT 機器のためのセキュリティ対策 …… 31
2.6 IoT を活用したセキュリティサービス …… 33
コラム：ちょっと見てみよう！ サイバーセキュリティ基本法 …… 35
章 末 問 題 …… 36

3. コンピュータアーキテクチャ

3.1 疑問：ソフトウェアが動作する仕組み …… 37
3.2 コンピュータアーキテクチャの基本的な構成要素 …… 38
3.2.1 マイクロプロセッサとメインメモリ …… 39
3.2.2 演算のためのデータ移動とメモリ階層 …… 39
3.2.3 入出力デバイスとバス …… 40
3.3 マイクロプロセッサの動作 …… 41
3.3.1 C 言語レベルの動作 …… 41
3.3.2 命令レベルの動作 …… 42
3.3.3 少し複雑な機械語コードの例 …… 44
3.3.4 コンパイラと開発フロー …… 45
3.4 マイクロプロセッサとソフトウェア …… 46
3.4.1 ポーリングと volatile 修飾子 …… 47
3.4.2 複数の入力デバイス …… 48
3.4.3 割 込 み …… 49
3.4.4 DMA コントローラと通信デバイス …… 51
3.4.5 オペレーティングシステムとコンピュータアーキテクチャ …… 52
3.4.6 タスクの抽象化 …… 53
3.4.7 ハードウェアの抽象化 …… 54
3.4.8 その他の抽象化 …… 55
3.5 処理性能と電力 …… 56
3.5.1 処理性能の視点と指標 …… 56
3.5.2 スループットとレイテンシ …… 57
3.5.3 クロック周波数と消費電力のトレードオフ関係 …… 58
コラム：メモリ容量が少ない？ …… 60
章 末 問 題 …… 61

4. リアルタイム

4.1 リアルタイムの問題 …… 62

4.2　並行性とその実現 …… 63
4.2.1　ポーリング …… 64
4.2.2　割込み …… 66
4.2.3　マルチタスク …… 67
4.2.4　並行性の問題 …… 68
4.3　リアルタイム性とは …… 68
4.3.1　リアルタイム性を実現するために …… 69
4.3.2　IoT におけるリアルタイム性と関連した課題 …… 69
コラム：新しいプログラミング言語パラダイム …… 70
章末問題 …… 70

第 2 部：IoT におけるデータと物理の利用

5. データの表現と利用

5.1　データからみた IoT システム …… 71
5.2　センサデータの構造化と視覚化 …… 73
5.2.1　データの構造化 …… 73
5.2.2　データの視覚化 …… 74
5.3　センサデータの統計処理 …… 76
コラム：測定，誤差，そして，最小二乗法 …… 80
章末問題 …… 81

6. センサ

6.1　センサの概要 …… 82
6.2　物理現象をどうやって捉えるか …… 83
6.3　変換を伴う計測 …… 84
6.4　センサからの出力形式 …… 86
6.5　時間遅れ，標本化 …… 88
6.6　センサ値の正しさ …… 90
章末問題 …… 92

7. アクチュエータ

7.1　インタフェース …… 93
7.1.1　インタフェース回路 …… 93

7.1.2 AD 変 換 …… 93
7.1.3 DA 変 換 …… 95
7.2 アクチュエータの制御 …… 96
7.2.1 PWM …… 97
7.2.2 シーケンス制御 …… 97
7.2.3 フィードバック制御 …… 98
7.2.4 フィードフォワード制御 …… 99
7.3 アクチュエータの種類 …… 99
7.3.1 電磁ソレノイド …… 100
7.3.2 空気圧アクチュエータ，油圧アクチュエータ …… 101
7.3.3 直 流 モ ー タ …… 101
7.3.4 交 流 モ ー タ …… 102
7.3.5 ステッピングモータ …… 102
7.3.6 サ ー ボ モ ー タ …… 103
章 末 問 題 …… 105

8. 物 理 モ デ ル

8.1 物理モデルの微分方程式モデル …… 106
8.1.1 電気回路の微分方程式モデル …… 106
8.1.2 機械振動系の微分方程式モデル …… 108
8.1.3 一般的な物理システムの微分方程式モデル …… 109
8.2 微分方程式を伝達関数に変換する …… 110
8.3 周波数伝達関数モデルに変換してシステムを読む …… 112
8.4 微分方程式を状態空間モデルに変換する …… 113
8.5 数学モデルで振舞いをシミュレートする …… 114
8.6 物理モデルでシステムの特性を読む …… 115
8.7 物理モデルに基づく制御系設計 …… 117
8.8 物理モデルの近似誤差と対処法 …… 118
8.8.1 非線形システムの線形近似 …… 118
8.8.2 連続時間システムの離散化 …… 119
8.8.3 アナログ信号の量子化 …… 120
8.8.4 通信遅延とむだ時間 …… 120
章 末 問 題 …… 121

第 3 部：開発プロセスとモデリング

9. IoT システムの開発プロセス

9.1　サービスの目標 ― なにができれば満足かを考えよう ―…… 122
9.2　開発プロセス…… 125
9.3　機能要求と非機能要求…… 127
コラム：アジャイル開発…… 130
章　末　問　題…… 131

10. モデリング

10.1　モデルとは…… 132
10.2　ユースケースの分析と記述…… 133
10.2.1　ユースケース分析…… 133
10.2.2　ユースケース記述…… 134
10.3　実行環境の調査…… 135
10.4　アクティビティ図…… 136
10.5　オブジェクト図…… 137
10.6　クラス図…… 139
10.7　シーケンス図…… 141
章　末　問　題…… 143

第 4 部：IoT システム事例

11. 高齢者の見守りシステム

11.1　ロボットやセンサが接続した見守りシステム…… 144
11.2　IoT サービスの統合…… 145
11.3　介護施設における見守りシステム…… 145
11.4　リアルタイム性能保証のためのミドルウェア技術…… 146
章　末　問　題…… 147

12. ドローン

12.1 ドローンとは…… 148
12.2 ドローンの構造…… 148
12.3 飛行制御…… 149
12.4 各種ドローン…… 151
12.5 ドローンの将来運用例…… 152
章末問題…… 153

引用・参考文献…… 154
章末問題解答…… 156
索引…… 162

0. 身近で新しいIoT

IoT（Internet of Things）という言葉は，急速に広まりつつある。本書を開いた皆さんは，どこかで耳にした言葉であろう。IoTは身近でありながら未来技術でもある。スマートフォンから，家庭のお風呂やエアコンのスイッチを入れられたり，コンビニの商品がお店の販売状況に応じて揃えられるということを聞いたことがあるだろう。これらのすでに実現されている便利な技術はIoTの一例である。さらに，未来型技術である自動車の自動運転もIoTの一つである。

本書は，このようなIoTの開発に携わるかもしれない皆さんに向けて，最初の一歩を手助けする書籍である。本章では，まず身の回りのIoTを思い描き，IoTとはなにかについてのイメージをつかんでほしい。そして，各章で学ぶべき内容とそのつながりについて理解してほしい。

キーワード：IoT，モノのインターネット，ICT，RFID，組込みシステム

0.1 身の回りのIoT

IoTというと難しく感じるかもしれないが，身近な例にはスマートフォンのサービスである。スマートフォンはわれわれの生活にしっかりと浸透し，それなしには生活できない皆さんも多いことだろう。まずは，スマートフォンを使用したIoT生活について考えてみよう。

スマートフォンに朝起きて語りかければ，今日の天気や交通情報，ニュースを教えてくれる。そして，先進的な活動計と連動していれば，スマート目覚ましとして使うこともできる。スマート目覚ましは，睡眠の深さを測り，心地良く目覚めるタイミングで適切な音量で目覚ましの音を鳴らし，部屋のライトをつけてくれる。加えて，睡眠状況を記録し，運動と合わせて健康管理までしてくれる。

また，スマートフォンやスマートスピーカーに話しかければ，テレビ専用のリモコンを触らなくても，動画サイトから配信される映画やドラマを，自宅のテレビで好みに応じて見ることができる。さらにIoTの幅は広く，ドローンを使った荷物配送システム，自動運転，高度に自動化された工場，遠隔医療，見守りシステム等，さまざまなものに応用されている。

このようなIoTのサービスは，「モノとモノがつながる」ことにより実現できる。例え

ば，交通情報は，路上に設置されたセンサやカメラ，自動車からのさまざまなデータがクラウド（世界のどこかにある大量のコンピュータを備えた設備）上に集まり，それを瞬時に分析し，スマートフォン，パソコン，カーナビ等に配信される。したがって，モノである（路上のセンサやカメラ，クラウド，スマートフォン，パソコン，カーナビ）がつながっている。

ところで，本章での**サービス**とは「システムから顧客に提供される価値」とする。一般にアプリと呼ばれているものがシステムであり，それが提供するなにかがサービスである。「スマート目覚まし」というアプリ（システム）があれば，上記のような「心地良い目覚め」という価値，すなわちサービスが提供されるということである。

図 0.1 で IoT の健康管理サービスについて考えてみよう。**図 0.2** には健康管理サービスと IoT の役割を示した。示す。モノであるスマートウォッチ，スマートフォン，スマートスピーカーにはおのおのスマートという言葉が付いている。これらは，本来の時計，電話，スピーカーの機能を持つ。つながることにより，健康管理と関連した運動状況や睡眠状態通知等のサービスをユーザに提供する。

健康管理サービスを提供するために，モノはどのようにつながっているのだろうか？ スマートウォッチはセンサの役割を果たし，心拍や歩数などを収集する（実際には内蔵された加速度センサ，緑 LED センサなどを利用）。スマートウォッチとスマートフォンは Bluetooth と呼ばれる通信でつながっている。そして，スマートフォンを経由し，情報はクラウド（0.5 節で説明する）に集められる。クラウドでは，膨大なユーザ情報を分析し，適切な運動や睡眠について分析する。その結果を**出力装置**であるスマートフォン，スマートス

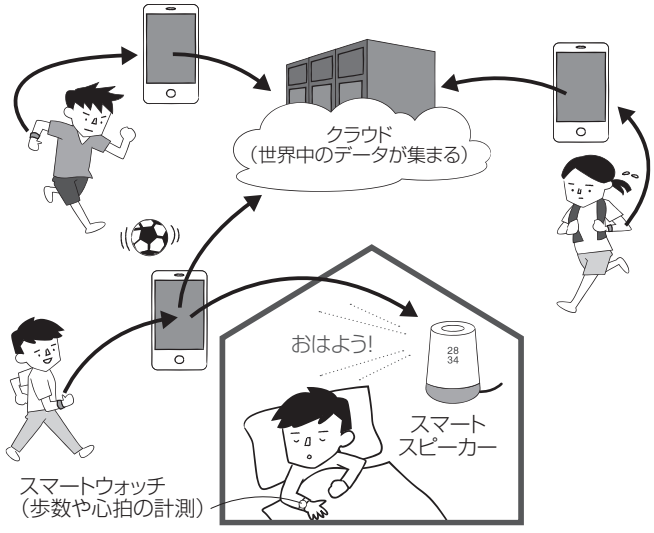
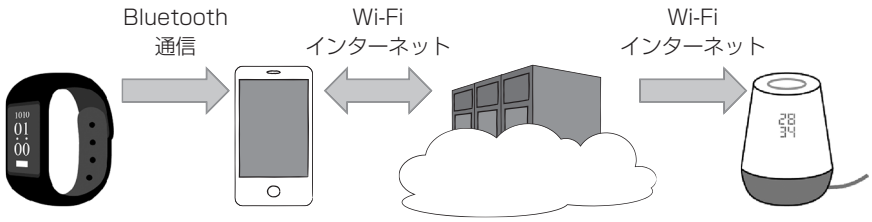


図 0.1　IoT による健康管理サービス



モ ノ	スマートウォッチ	スマートフォン	クラウド	スマートスピーカー
本来の機能	時 計	電 話		スピーカー
ユーザからみたIoTサービス	・歩数，心拍，呼吸を計測し表示。 ・運動目標を達成するとご褒美の動画を表示。	・運動状況，睡眠状況を表示。 ・運動や睡眠が足りなければ，励ましのメッセージを表示。目標達成すれば，ご褒美動画を表示。 ・運動や睡眠の詳細をグラフで表示する。		・尋ねると，運動状況を音声で通知する。 ・睡眠状態に応じた目覚ましになる。
IoTでの役割	《センサ》 歩数，心拍，呼吸などを集める。	《インターネットと接続》 スマートウォッチから集めた情報をクラウドに送る。 《出力装置》 クラウドから得た情報を表示する。	《ビッグデータの解析》 ・個々のユーザ情報である歩数心拍を集める。 ・その量は膨大なビッグデータ(0.5節)となる ・ビッグデータをもとにユーザの活動と心拍の関係などを分析する。 ・分析の結果，適切な運動量，適切な睡眠などを判断する。	《出力装置》 ・クラウドから得た情報により，運動状況を音声で通知。 ・クラウドから得た情報により，適切な音量で適切な時間に目覚ましを鳴らす。

図 0.2 健康管理サービスと IoT の役割

ピーカーに送り，表示や音声を出力する。

0.2 IoT と は

IoT は Internet of Things の略であり，**モノのインターネット**と一般に直訳されている。その定義は正式には決められていない。国際標準を決める組織 IEEE では，サマリー[1),†]において次のようにおいて述べている。

モノのインターネット (IoT) は以下のようなシステムとして広く知られている。センサ，アクチュエータ，スマートオブジェクトのネットワークで構成され，その目的は，日常のモノ，産業的なモノを含む「すべて」のものを，インテリジェント

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

でプログラム可能で，そして人間と相互に作用できるように，つなげること。

この文に続き，「IoT は急速に広がり，その可能性は大きく複雑であるため，定義することは容易ではなく，共通の定義はない。」と述べている。したがって，世界標準の定義はない。本書では，IoT とは，「複数のモノがネットワークでつながり，さまざまなサービスを提供するシステム」とする。以上の通り，IoT には各分野に応じた見方や意味がある。また，本書では，必要に応じて各章で IoT について説明する。

さて，IoT はどのように始まったのだろうか？ その誕生は，1999 年にマサチューセッツ工科大学（MIT）のケビン・アシュトン（Kevin Ashton）が使ったのが最初とされ，**RFID**（Radio Frequency Identification）の研究中に生まれた。RFID は，電波（RF）でモノの ID（identification）を扱う技術である。身近な例では，Suica などの交通系 IC カードがあげられる。RFID により，どこにモノがあり，どのように移動しているかを追跡できるようになった。RFID の登場により，モノとモノがつながる基盤ができたと言える。

IoT という言葉は，その始まりと同時に流行したのではなく，10 年以上後の米国 CISCO の 2011 年 4 月に公開されたホワイトペーパー[2)]がきっかけである。このドキュメントでは 2008 年から 2009 年の間に，世界人口よりも，多くのモノがつながっていることが示され，世界中に衝撃を与えた。これをきっかけに IoT の重要性が広く知られるようになった。

0.3　IoT と ICT

IoT と関連した言葉に，コンピュータとコンピュータがつながる**情報通信技術**（Information and Communication Technology：**ICT**）がある。この ICT と IoT はどのように異なるのだろうか？ IoT と ICT の関係を理解するために，その歴史を紐解こう。

ICT は，1960 年から 2 回の変革を起こし，現在 3 回目の真っ只中にいると言われている。最初の変革は，1960～70 年代である。身近なところでは，ATM キャッシュディスペンサーの登場である。ATM は 1965 年にイギリスで誕生し，1969 年に日本で導入された。この時代に注文処理，経費の支払いなどの業務が自動化された。一般人も ATM を通じて部分的な恩恵を受けていたが，企業の業務形態が大きく変革したことが特徴と言える。

第 2 の変革期は 1980～90 年代であり，**インターネット**の発明である。インターネットは 1982 年の **TCP/IP** プロトコルの提案によりはじまる。インターネットにより，どこからでも低コストでつながるようになった。World Wide Web が登場し，チャットやメール，インターネットでの検索，そして買い物も可能になった。企業にとっても，世界各地に分散している販売店と緊密な連携が可能になるなど大きく利益を得たが，個人がつながるようになった意味は大きい。

第3の変革期が，IoTが提案された2000年以降の現在である。モノにコンピュータが組み込まれた時代である。コンピュータを組み込んだモノを**組込みシステム**（embedded system）と呼ぶ。組込みシステムという言葉が日本で普及しだしたのは，2005年頃からである。例えば，自動車には200個以上ものコンピュータが搭載され，RFIDにより交通系ICカードが普及し，食肉用家畜を追跡できるようになった。

0.4 IoT 時 代

IoT時代である現在，技術による生活・社会の変革が2000年以前と変わってきたようである。2015年4月のハーバードビジネスレビュー[3)]では，0.3節で述べた通り，第3期を現在とし，IoT時代としている。これは2000年よりあとに，インターネットやRFIDほどのインパクトのある通信技術の発明がないためと思われる。もちろん，IoTに最適化された通信技術の低電力広域無線LPWA（Low Power Wide Area）など新しい技術は続々と提案されている。

一方，筆者らは2005年頃と現在（2019年）は，明らかな違いがあり，第4の変革期なのではないかとも推測している。2005年当時を振り返ると，組込みシステムは「専用コンピュータ」であるという意味を包含していた。パソコンは，ゲームにも業務管理にも用いられる汎用コンピュータである。一方，コンピュータ内蔵の掃除機は掃除「専用コンピュータ」である。

これまで述べてきた通り，IoTでは一つのモノがさまざまな役割を果たす。例えば，自動車に組み込まれたコンピュータは，自動車の位置を把握するのに使われると同時に，盗難にあった際の追跡に使われるだろうし，さらに，渋滞情報に使われるかもしれない。したがって，組込みシステムという言葉が流行していた2005年には，一つのモノが複数のサービスに使われるという意味では用いられていなかったと言える。現在，組込みシステムについて「専用」という意味は薄らいでいる。なお，組込みシステムという言葉は，流行とは無関係に「モノ」の仕組みを理解するうえで重要な言葉である。

それ以外においても，2005年頃と現在では，ICTは大きく変化し，現在のIoTという言葉のイメージは，誕生した頃とは異なる。そこで，いつ頃からなにが変わったのだろうか？ということについて筆者らと議論してみた。はっきりとはしないが，2014年前後から変わったのではないかという意見が多かった。

大きな変化としては，やはりスマートフォンの登場であるが，2007年のiPhoneが登場直後に，生活が大きく変わることはなかった。2014年頃の変化を考えると，電子書籍が一般化し，仮想通貨も普及し出した。さらに，スマートスピーカーなどが登場した。これらは，

索　　引

【あ】

アクシデント 32
アクセラレータ 60
アクチュエータ 99
アクティビティ 136
アクティビティ図 136
アクティブ 84
アセンブラ 43
アセンブル 42
アドレス 13, 39
アナログ信号 94
アナログ量 94
暗　号 32

【い】

移植性 131
位　相 112
1 次遅れ系 111
1 フレーム 89
イベントフロー 135
インシデント 32
インスタンス 140
インダストリアル
　インターネット 6
インターネット 4, 12
インターネットワーキング技術 14
インタフェース 93

【う】

ウェルノウンポート 21

【え】

液柱温度計 83
エッジコンピューティング 7

【お】

オブザーバ 120
オブジェクト 138
オブジェクト図 137
オペコード 42
オペランド 42
オペレーティングシステム 52
オームの法則 107
温度ヒューズ 83

【か】

回帰分析 76
解　析 71
外部記憶装置 55
開ループ 99
鍵情報 32
拡張性 145
可視光通信 13
仮想メモリ 54
加速度 109
カットオフ周波数 112
ガード条件 136
カプセル化 18
可用性 25
カルマンフィルタ 120
監　視 71
慣性力 109
完全性 25
感　度 92
関　連 140

【き】

偽陰性 91
偽陰性率 92
機械学習 86, 145
機械振動系 108
機　能 122
機能適合性 129
機能要求 122
揮発性 48
基本設計 126
基本論理素子 60
機密性 25
キャッシュ 40
キャッシュメモリ 40
脅　威 25
境　界 28
共振周波数 113
偽陽性 91
偽陽性率 92
キルヒホッフの電圧則 107
極 111

【く】

空気圧アクチュエータ 101
偶然誤差 90
組込みシステム 5, 8
組込みソフトウェア 8
クライアント 21
クラウドコンピューティング 7
クラス 139
クラス図 139
クロスコンパイラ 46
クロスコンパイル 46

【け】

計　画 71
計算機 37, 38
携帯通信網 21
系統誤差 90
経路制御 15
ゲイン 111, 112
ゲートウェイ 14
現代制御理論 113

【こ】

効率性 129
交流モータ 102
互換性 130
誤　差 76
コンデンサの動作原理 107
コンパイラ 45
コンパイル 45
コンピュータ 37, 38
コンピュータアーキテクチャ 38

【さ】

再現率 92
最小二乗法 77
サイバーセキュリティ 25
サイバーフィジカルシステム 7
サーバ 21
サービス 2, 122
サーボ機構 103
サーボモータ 103
サーミスタ 83
参　加 14
算術論理演算装置 39
サンプリング 89
サンプリング周期 89
サンプリング周波数 89

【し】

シェーダ 60
時間変化 84
シーケンス図 141
シーケンス制御 97

事　故 32
資　産 25
事　象 32
システム境界 133
システムコール 53
自然角周波数 111
実現可能性 126
実　行 39, 71
実行可能コード 45
実行可能バイナリ 45
実　装 126
時定数 111
自動車工学 119
シナリオ 129
周波数伝達関数モデル 112
主キー 73
主記憶 39
出力装置 3
出力方程式 114
受動的 84
詳細設計 126
使用性 130
状態観測器 120
状態空間モデル 113
状態変数ベクトル 113
状態方程式 114
情報通信技術 4
初期ノード 136
処理手順 127
シリアル方式 87
シングルタスク 67
シングルプロセス 67
人工知能 8
信頼性 130

【す】

スケーラビリティ 145
ステッピングモータ 102
ステップ応答波形 111
ストア命令 43
スマートシステム 7
スループット 57
スループット性能 57

【せ】

正確さ 90
正確度 90, 92
制御量 98
脆弱性 25
精　度 90, 92
製品品質モデル 128
正方行列 114
精密さ 90
赤外線通信 13
積　分 84
セキュリティ 24, 130
セキュリティバイデザイン 32
接　続 16
センサ 82

【そ】

操　作 140
属　性 138, 140
即　値 44
速　度 109
ソサイエティ 5.0 6
ソフトウェア 39

【た】

第一原理 106
耐故障性能 145
ダイナミックマップ 29
第 4 次産業革命 6
ターゲット 46
タコジェネレータ 104
多重化 53
タスク 53
多発型回転翼機 148
単位行列 114
段階的詳細化 126
ダンピング係数 111

【ち】

遅　延 57
力の平衡条件 109
逐次処理 57
蓄　積 84
地上側制御装置 149
直流モータ 101

【つ】

通　信 12
通信シーケンス 16

【て】

ディジタル信号 93
ディジタルトランス
　フォーメーション 6
ディジタルフィルタ 89
ディジタル量 94
定常ゲイン 111
ディペンダビリティ 29
適合度 92
デシジョン 136
データ蓄積 145
データ転送命令 43
データの構造化 73
データ分析 75, 145
データモデリング 72
デッドライン 68
デバイスドライバ 54
テーブル 72
デューティ比 97
電　荷 107
電磁ソレノイド 100
伝達関数 110
伝達遅延 120
電流の定義 107

【と】

統一モデリング言語 132
統計モデリング 72
同定モデル 110
動的要素 109
特異度 92
特性方程式 111
特権命令 55
特権モード 55
トポロジー 17
トレードオフ 59
ドローン 148

【な】

内部割込み 55
名　前 140

【に】

二次元バーコード 86
2 次振動系 111
入出力 40
入出力デバイス 38
認知系 145

【ね】

ネイピア数 114
熱電対 83
ネットワーク 12
ネットワークアーキテクチャ 18
粘性摩擦 109

【の】

ノイズ 86
能動的 84
ノード 13
ノンホロノミック性 119

【は】

排他制御 54
バイメタル 83
白　金 83
パケットフォーマット 16
バ　ス 41

バス通信規格 19
パターン認識 86
パッシブ 84
パーティション 136
ハードウェア 54
ハードウェアタイマ 54
パラレル接続 87
パルス 86
パルス位置 86
パルス位置変調 86
パルス幅 86
パルス幅変調 86, 97
番　地 39
半導体 LSI チップ 37

【ひ】

比較命令 44
光通信 13
光ファイバ 13
非機能要求 123
非線形システム 118
ビッグデータ 7
非特権命令 55
微　分 84
標本化 89
標本化周期 89
標本化周波数 89
品　質 127

【ふ】

ファイルシステム 55
フィードバック制御 98
フィードフォワード制御 99
復　号 32
フックの法則 109
物理セキュリティ 25
物理モデリング 72
フライトコントローラ 149
プリアンブル 16
フルメッシュ型 17
フレームフォーマット 16
フレームレート 63
プログラミング言語 37
プログラム 39
プログラムカウンタ 43
プログラム可能配線 60
プロセッサコア 39
プロトコル 15
分割統治 126
分　岐 43

【へ】

ベアメタル 53
並行性 62, 68
閉ループ 98
並列処理 57
ペイロード 16
ページング 54
ヘッダー 16

【ほ】

放射温度計 83
保守性 130
ボード線図 112
ポート番号 21
ポーリング 47, 64

【ま】

マイクロアーキテクチャ 45
マイクロコントローラ 37
マイクロプロセッサ 37, 39
マイコン 37
マルウェア 26
マルチコアプロセッサ 39
マルチコプタ 148
マルチスペクトラムイメージング 86
マルチタスク 53, 67
マルチプロセス 67
マルチロータヘリコプタ 148
満足性 129

【む】

無人航空機 148
無人自動車 148
無人船 148
無人潜水機 148
無線 LAN 20
無線センサノード 20
無線通信 13
むだ時間要素 120

【め】

命　令 39
命令セットアーキテクチャ 42
命令フェッチ 43
メインイベントフロー 135
メインメモリ 39
メッセージフォーマット 16
メモリ 38
メモリアクセス 39
メモリ階層 40
メモリカード 55
メモリコントローラ 39
メモリ保護 54
メモリマップド入出力 41

【も】

目　標 122
モデル 10
モデル駆動開発 132
モデルベース開発 132
モノのインターネット 3

【ゆ】

油圧アクチュエータ 101
有効性 128
優先度 51, 68
ユーザモード 55
ユースケース 128, 133
ユースケース記述 133
ユースケース図 133
ユースケース分析 133
ユースケース名 135

【よ】

要求分析 126
予測誤差 76

【ら】

ライフサイクル 28, 126
ラプラス変換 110
ラベル 45
ランタイム 46

【り】

リアクティブ性 68
リアルタイム性 62, 68
離散化 115
リスク 25
リスク回避性 129
リモートセンシング 86
量子化誤差 94
利用時の品質モデル 128
利用状況網羅性 129
リンク 13, 138

【る】

ルーティング 15

【れ】

例　外 55
レイテンシ 57
レイトモノトニック 69
レジスタ 39
レジリエンス性 29

【ろ】

ロータリエンコーダ 104
ロード命令 43

ロバスト制御理論 114
ロボット工学 119

【わ】
割込み 49, 66
割込み禁止・許可 51
割込みコントローラ 51
割込みハンドラ 51, 66
割込みベクタテーブル 50
割込み優先度 51

【A】
AD 変換 87, 94
AD 変換器 94
AI 8
ALU 39
analyze 71
ARPANET 22

【B】
Bluetooth 20

【C】
CCD 89
CPS 7
cps 89
C 言語 41

【D】
DA 変換 96
DA 変換器 96
db 90
DMA コントローラ 51
DX 6

【E】
ESC 149
execute 71

【F】
FC 149
FCS 16
FPGA 60

【G】
GB 39
GCS 149
GFLOPS 56
GPU 60

【H】
H_∞ 理論 121
HDD 55
HTTP 21
Hz 89

【I】
I^2C 19
ICT 4
IEC60381-2 86
IEEE802.11 20
IEEE802.15.1 20
IEEE802.15.4 20
IEEE802.3 イーサネット 19
IEEE-std830-1998 127
Industry4.0 6
IoT 1
IP アドレス 14

【J】
JIS25010：2013 128

【L】
LAN 13
LPWA 20

【M】
MARTE 132
MB 39
monitor 71
MQTT 22

【O】
OSI 参照モデル 18
OS レス 53

【P】
PID 制御 99
plan 71
PPM 86
PWM 86, 97

【R】
RC 電気回路 106
RFID 4
ROS 146
ROV 148
RS-232C 19
RT ミドルウェア 146

【S】
SNR 90
S/N 比 90
Society5.0 6
SPI 19, 87
sps 89
SSD 55
SysML 132

【T】
TCP/IP 4, 21

【U】
UART 88
UAV 148
UDP 21
UGV 148
UML 132
UMV 148
USB 19
UTP 20

【V】
V2C 通信 29
V2I 通信 29
V2V 通信 29
VTOL 型 152
V 字モデル 126

【W】
WebSocket 21

【Z】
Ziegler-Nichols 法 121
ZigBee 20

―― 編著者略歴 ――

渡辺　晴美（わたなべ　はるみ）
1990 年　東京工科大学工学部情報工学科卒業
1990 年　日本電気マイコンテクノロジー株式会社勤務
1995 年　東京工科大学大学院工学研究科修士課程修了（システム電子工学専攻）
1998 年　東京工業大学大学院情報理工学研究科博士課程修了（システム電子工学専攻）博士（工学）
2004 年　東海大学講師
2011 年　東海大学教授
現在に至る

久住　憲嗣（ひさずみ　けんじ）
1997 年　福井工業高等専門学校電子情報工学科卒業
1997 年　信州大学工学部情報工学科編入学
1999 年　信州大学工学部情報工学科卒業
2001 年　奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了
2004 年　九州大学大学院システム情報科学府博士後期課程修了（情報工学専攻）博士（工学）
2004 年　科学技術振興機構研究員
2005 年　九州大学特任講師
2008 年　九州大学准教授
現在に至る

今村　誠（いまむら　まこと）
1984 年　京都大学工学部数理工学科卒業
1986 年　京都大学大学院工学研究科修士課程修了（数理工学専攻）
1986 年　三菱電機株式会社勤務
2008 年　博士（情報科学）（大阪大学）
2016 年　東海大学教授
現在に至る

つながる！ 基礎技術　IoT 入門
― コンピュータ・ネットワーク・データの基礎から開発まで ―
Internet of Things for Beginners:
Computer Architecture, Networks, Data and Software Model

© Harumi Watanabe, Makoto Imamura, Kenji Hisazumi 2020

2020 年 1 月 20 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

編 著 者　渡 辺 晴 美
今 村 誠
久 住 憲 嗣
発 行 者　株式会社 コ ロ ナ 社
代 表 者 牛 来 真 也
印 刷 所　新 日 本 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　https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-02900-0　C3055　Printed in Japan　（松岡）

JCOPY ＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞
本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088，FAX 03-5244-5089，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

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。