

ロボット 1

ロボット 1

1章 ロボットとは

「ロボット」の起源は、チェコの作家カレル・チャペック (Karel Capek, 1890-1938) の戯曲「R.U.R. (Rossum's Universal Robots, ロッサム万能ロボット)」(1921)にある。肉体的苦痛を感じず、喜怒哀楽や死に対する恐怖を持たないが、人間と外観の変わらない人造人間(ロボット)をR.U.R社が開発して大量生産し、人間の労働の肩代わりをさせるといものである。この戯曲は、ロボットたちが反乱を起こし、人類を抹殺し始めるという、恐ろしい話である。Robotは、チェコ語で強制労働させるという意味をもつ Robotka という言葉からきており、奴隷機械という意味を持たせた造語である。フランスの作家ビリエ・ド・リラダン(Villiers de L'Isle-Adam, 1838-1889)が書いた小説「未来のイブ」(1886)に「アンドロイド(android)」というロボットが登場する。これはエジソンが発明した絶世の美女ロボット「アダリー」がアンドロイドという言葉を作り、話していることから名づけられた。

また、ドイツの詩人ゲーテ(Goethe, 1749-1832)が書いた戯曲「ファウスト」には、錬金術師が作った人造人間「ホムンクルス(Homunculus)」が登場する。さらに、イギリスの小説家メアリ・シェリー(Mary Shelley, 1797-1851)の小説「フランケンシュタイン」にも、フランケンシュタイン博士が生み出した怪物のような人造人間が登場する。

このようにチャペックが「ロボット」という言葉を作る以前にも、ロボットの概念や形は存在していた。これらの作品ではロボットは、人間に害を加えたりその存在を脅かしたりするもので、ロボットは人間にとって否定的な存在であった。この背景には、宗教的な影響が強く影を落としている。

第1条	ロボットは人間に危害を加えてはならない。 また、人間に危害が及ぶのを見逃してはならない。
第2条	ロボットは人間から与えられた命令に従わなければならない。 ただし、与えられた命令が第1条に反する場合は、この限りではない。
第3条	ロボットは第1条および第2条に反しない限り自身を守らなければならない。

図1 アイザック・アシモフのロボット工学三原則

このような作品に影響されてか、欧米では、人型ロボットに対して嫌悪感を抱く人が多いといわれている。しかし、現在ではこの感情もだいぶ薄れ、世界各地でロボットの研究が行われている。現在ロボットは、アメリカの作家アイザック・アシモフ(Isaac Asimov, 1920-1992)が「われはロボット」(1942)で記したロボット工学三原則(ロボット・人口知能の論理規則)により定義され、論理的に規制されているといってもよい。一方、日本ではロボットというと、アニメの影響が強く、中でも手塚治虫(1928-1989)の「鉄腕アトム」がそのイメージを日本人に植え付けた。また、横山光輝による遠隔操縦の「鉄人28号」、永井豪による人間搭乗型ロボットの「マジンガーZ」、「機動戦士ガンダム」などの登場により、ロボットのイメージはバーチャルな世界で広がることとなった。日本ではロボットは、ヒーロー的な存在であり、困ったときに助けてくれるという、欧米とは逆の存在である。日本をロボット大国にのし上げた背景には、こういったロボットに対する国民感情の違いが大きかった。

しかし、ロボットの「定義」は、産業用ロボットの定義を除き、現在でもあいまいである。ロ

ロボットは人工知能に代表されるように、より知的になればなるほど「人間」との感情的なかわりが重要になり、「ロボットとは何か＝人間とは何か」という問題になりうるからである。これは工学の世界だけで定義できる問題ではない。

1-1 ロボットの歴史

18世紀ごろ、時計や自動装置に使用されていた機構や加工の技術が応用され、自動人間（オートマタ）というロボットのがん具が作り始められた。スイスのジャケドロスは絵を描いたりオルガンを演奏する自動人形を製作したり、かなり精巧に人間のふるまいを実現していた。同じころ、日本にも「からくり人形」が多く登場する。細川頼直の茶運び人形や五段返し、「東洋のエンジン」と呼ばれ現在の東芝の創始者でもある田中久重の弓曳童子は有名である。19世紀になると、「フランケンシュタイン」「ファウスト」「未来のイブ」などが発表され、20世紀に入って、チェペックの「R.U.R.」でロボットという言葉が生まれる。さらに、アシモフによってロボット工学三原則が規定された。

(a) 産業用ロボット

1952年にNC (Numerical Control) 工作機械が開発される。これを期に現在われわれが工場で見にするロボットが開発されるようになる。1962年に産業用ロボットが製品になったり、アメリカのユニメーション社が「ユニメート」を、AMF社が「バーサトラン」を発表したりする。日本では1969年に川崎重工業が「川崎ユニメート2000」を発表し、これを期に産業用ロボットが普及し始めた。

(b) 二足歩行ロボット

産業用ロボットが普及する一方で、1966年に早稲田大学が2足歩行の人型ロボットの研究を始め、1973年に世界初のヒューマノイドロボット「WABOT-1」を開発した。一方、ホンダも1986年に二足歩行ロボットの研究を始め、1996年に「P2」、翌年に「P3」、そして2000年には「ASIMO」を発表した。ホンダは短い期間に驚異的な技術力で、一躍世界のトップへと躍り出た。20世紀から21世紀への世紀の変わり目に、経済産業省が「HRP」、ソニーが「SDR」を発表し、続々とヒューマノイドロボットが開発され、注目を浴びる分野となった。

年代	ロボット技術とその具体例
18世紀ごろ	自動人形(オートマタ)の登場 ポーカンソンのアヒル ジャケドロスの自動人形 弓曳童子
1950年代	NC工作機械の誕生 マシニングセンタ(カーネイ・アンド・トレッカー,1959)
1960年代	産業用ロボット盛んに 川崎ユニメート(川崎重工業,1969) 二足歩行ロボットの研究始まる
1970年代	WABOT-1(早稲田大学,1973)
1980年代	P1(ホンダ,1986)
1990年代	P2(ホンダ,1996)、P3(ホンダ,1997)
2000年代	ASIMO(ホンダ,2000)、HRP(経済産業省)、SDR(ソニー) 福祉、医療、災害支援、接客など、ロボットの応用分野が広がる

図2 ロボットの歴史

1-2 ロボットの種類

(a) 多目的ロボット

多目的ロボットは、人間との共存を目指すロボットである。人間と会話し、手伝いをするなど、かなり人間に近い働きをする。人間とともに生活するために、人間の姿に似ているほうが親和感を得られるので、ヒューマノイド型である場合が多い。人間とぶつからずに狭いところを通り抜ける、階段を上り下りする、ドアを開閉する、さらに身ぶり手ぶりなどかわいらしさを演出できるなど、その身体能力や知能は日々進歩している。

(b) 生活コミュニケーションロボット

生活コミュニケーションロボットは、人間が話しかけたり触れたりすることで、ロボットが喜怒哀楽を表現し、感情レベルのコミュニケーションを可能とする。また、ロボットどうしでコミュニケーションをとり、仕事を行うロボットもある。

これらのロボットの多くは、コミュニケーションをとるために、声や音などを聞き取る聴覚の働きをする音声認識、ロボットの置かれている環境や人間の顔などを認識する視覚にあたる画像認識、なでられたりたたかれたりといった行動を認識する人間の触覚にあたる機能を持つセンサなど、人間の五感に近い感覚機能を備えている。

(c) 接客ロボット

接客ロボットは、人間そっくりな外観を持ち、人とコミュニケーションをとり、接客をするロボットである。愛知万博のアクトロイドは、日本語、中国語、韓国語、英語の4ヶ国語を操り、来場者の接客をした。

(d) 作業支援ロボット

作業支援ロボットは、オフィスや商業施設など、人がいる環境で、案内、搬送などの作業を支援するサービスロボットである。形状は作業効率を優先しているため、二足歩行型より車輪型や四足歩行型が主で、作業用途に適した形をしているロボットが多い。しかし、多くのロボットはヒューマノイド型をしており、違和感がなく人間社会に溶け込める配慮がなされている。

(e) 掃除ロボット

掃除ロボットとは、障害物センサや段差センサにより、自動的に掃除エリアを認識し、そのエリアを掃除するロボットである。屋外用と屋内用がある。屋外用には、ロボットの進行方向の障害物を検出するレーザレーダ、動いた角度で方向を検出するジャイロセンサなどを搭載している。屋内用のロボットは家庭用が主で、障害物を感知し進路を修正する高感度タッチセンサ、階段などの段差を認識する段差センサなどを用いている。

(f) 警備ロボット

警備ロボットは、ビルなどの設備を警備して回り、万一、侵入者を見つけた場合、撃退できるような装備が搭載されている。警備ロボットは、屋内外問わず自立歩行が必要であり、不審者・不審物の発見や高速での移動が可能で、高度な車体の制御・センシング技術を備えている。

(g) レスキュー支援ロボット

レスキュー支援ロボットは、災害現場などで大きな力が必要な作業を行ったり、救助隊員が近づけない危険な場所での作業を代行するロボットである。

(h) 福祉ロボット

福祉ロボットは、主に重度障害者や高齢者などの生活を補助するためのロボットである。自律型ロボットは少なく、障害者自身の操作によって動くものが多い。

(i) 医療ロボット

医療ロボットには、手術ロボット、介護ロボット、超小型ロボットなどがある。これらは、ナビゲーションや治療を目的とするなど多種多様である。医療ロボットには、高い安全性が求められる。

(j) がん具ロボット

がん具ロボットは、見たり、触れたり、話しかけたりしながら楽しむことを目的としている。中には、さまざまなセンシング技術や音声認識といった高度な技術を用い、人間と触れ合うことで成長するロボットもある。

2章 ロボットの構成

2-1 メカトロニクス

メカトロニクス (mechatronics) とは、機械 (mechanism) と電子 (electronics) が融合して作られた和製英語である。機械と電子が、それぞれの特徴を生かし、互いの弱点を補うのがメカトロニクスである。このメカトロニクス技術により、ロボットは構成されている。ロボットはハードウェアとソフトウェアの要素に大別できる。ハードウェア (hardware) は、JIS用語で「情報処理システムの物理的な構成要素の全体又は一部分」とされ、ソフトウェア (software) は「情報処理システムのプログラム、手続き、規則及び関連文書の全体又は一部分」とされている。つまり、ハードウェアは物的なもので、ソフトウェアは知的なものということになる。

2-2 メカトロニクス技術

(a) メカニズム

メカニズムとは、機械の機構とその機構による運動を伝達するものである。人間の腕を機械で

作ろうとするとき、ロボットは腰・肩・上腕・ひじ・前腕・手首・手・指が行う運動を可能にする機構を備えなければならない。このように各構成要素を組み合わせ、一つのシステムに構成されたものがメカニズムである。

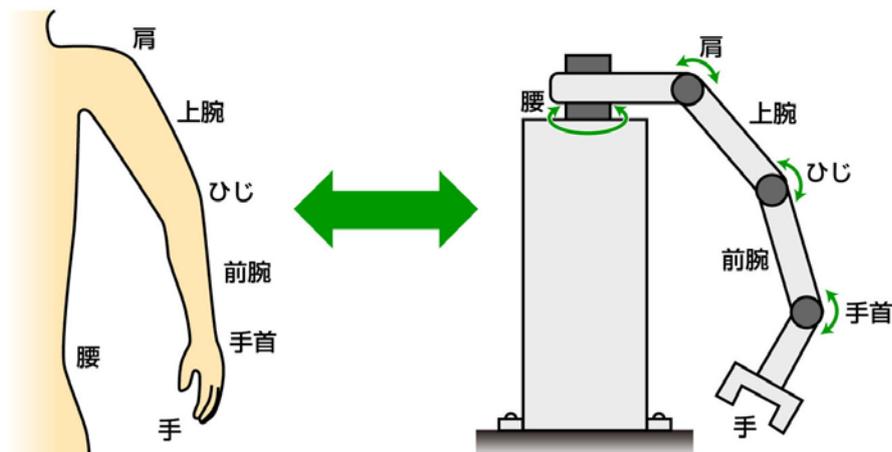


図3 人間の腕とロボットアームの構成

(b) アクチュエータ

メカニズムを構成しても、それを動作させるためには駆動源が必要となる。この駆動源がアクチュエータであり、腰・肩・ひじ・手首といった関節部分がそれにあたる。さまざまな種類のアクチュエータが存在し、電力を利用するモータ（ステッピングモータ、DCモータ、ACモータ）、空気圧、油圧を利用するもの、 piezo素子や超音波を利用するもの、人工筋肉といった特殊型などがある。それぞれのアクチュエータは、大きさ・重量・制御性など、その性能は一長一短で、用途によって使い分ける必要がある。

(c) 動力源

ロボットのメカニズムを動作させるアクチュエータも、動力源がなければ動作しない。動力源については、ロボットの用途や使用するアクチュエータの種類によって使い分ける。産業用ロボットのような工場内で使うのか、屋外で使うのか、人間が立ち入ることができないような特定領域で作業するのかによって、使用する動力源は変わってくる。

(d) センサ

センサは、ロボットのみずからの動きや外界の情報をとらえるもので、計測しようとする物理量や測定原理によって多種多様である。変位・速度・加速度・力・角度・角速度・角加速度・距離などの物理量を、電圧に変換するものが主である。

(e) コンピュータ装置

センサでとらえられた機械の動きは、その動きに比較する連続的な電気信号で与えられる。このような連続的な信号はアナログ信号が多く、このままではコンピュータに取り込めない。コンピュータ内で扱われる信号はデジタル信号であり、センサからのアナログ信号はA-D (Analog to Digital) 変換されてから、コンピュータに取りこまれる。また、逆にコンピュータ内の信号をアナログ信号に変換する場合には、D-A (Digital-to-Analog) 変換器を介する。コンピュータ内部ではプログラム言語を用いてプログラムが作られる。プログラム言語はアセンブリ言語、C言語などが一般的であるが、そのロボットや工作機械専用の言語も存在する。

(f) 制御

制御は広義のソフトウェア技術である。ソフトウェアといっても、コンピュータ言語やその管理の技術ではなく、センサからの信号をもとにアクチュエータや機構をいかにうまく動作させるかを考え、そのための信号処理の方法やそのプログラムを作る技術が制御である。

2-3 開発システム

(a) 開発の流れ

基本的な開発手順で設計から組立までの機械加工の工程を行うと、コストがかかり試行錯誤ができない。また、機械加工の工程がうまくいっても、動作の段階に至り、強度や機構に問題が発生すると、再度設計し直しとなり、開発コストがかさむ。比較的構造が簡単で、アクチュエータの

数も少なければ、多少のハードウェアの欠点もセンサ信号を用いた制御プログラム処理でカバーできる。しかし、歩行ロボットのようにアクチュエータの数が多く、メカニズムが複雑になると、ハードウェアのガタは致命的な欠陥となり、もはやソフトウェア処理ではカバーしきれなくなる。

そこで、効果的な開発方法としてモデルベース開発 (model base development) という方法がある。これは、CAD 上で設計したものを検証し、不具合があれば再度設計して検証するという試行錯誤をコンピュータ上で行い、コンピュータ上のモデルで開発を進めていく方法である。

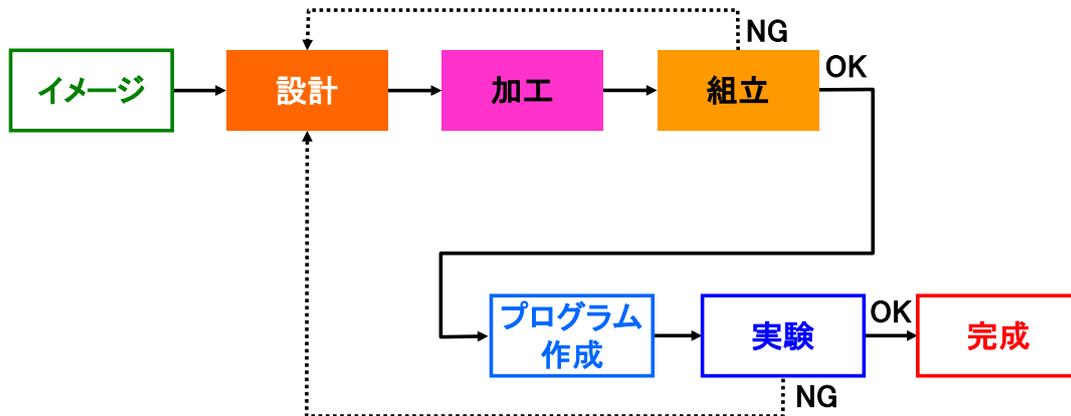


図 4 基本的な開発手順

(b) CAD

CAD とは Computer aided design の略で、コンピュータによる設計支援システムを指す。CAD を使うことによって、図面は手書きよりも修正が簡単になり、また図面の保存も簡単で、過去の図面を有効的に活用できる利点がある。CAD は広く使われるようになっており、現在いまでは二次元 CAD から、より情報量が多く、直感的にわかりやすい三次元 CAD に移行している。CAD 上で、使用する材料を指定すれば、そのものの重量や重心位置が簡単にわかり、より詳細な解析が可能となる。また、ロボットを組み上げたアセンブリ状態で、各パーツの干渉チェックや構造解析も可能で、コンピュータ上での設計の試行錯誤が容易にできるようになっている。

(c) CAM

CAM とは computer aided manufacturing の略で、コンピュータによる製造支援システムを指す。CAD を用いて作成した図面をもとに、コンピュータ制御された工作機械を使って、ワークを加工する。これにより、作業時間が短縮され、コストも削減することができる。ただし、コンピュータ制御可能な工作機械は高価で、CAD/CAM システムを構築するには、かなりの設備投資が必要となる。

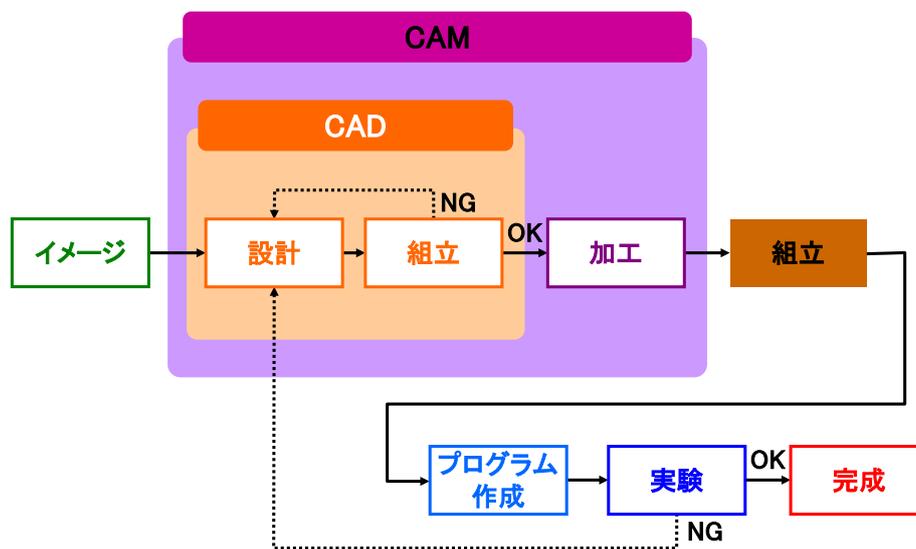


図 5 CAD・CAM を用いた開発手順

(d) CAE

ロボットはソフトウェアを組み込まないと作動しない。このソフトウェア開発の試行錯誤を繰り返していると、作業中のフレームに過剰に負荷がかかって部品が破損したり、アクチュエータのトルク不足、所望の動作ができないというような問題が発生する。また、ソフトウェアにバグがあることに気付かないままロボットに実装すると、暴走し、大きな事故につながるおそれもある。これでは、再設計や再加工を余儀なくされ、時間とコストがかさみ、CAD/CAMシステムが効率的に運用できなくなる。CAEとは computer aided engineering の略で、コンピュータによる開発工程支援システムを指す。CAEの適用により、ロボットにソフトウェアを組み込んだ状態での実験や解析を、コンピュータ上でのシミュレーションに置き換えることができ、開発スピードやコストの削減が可能となる。

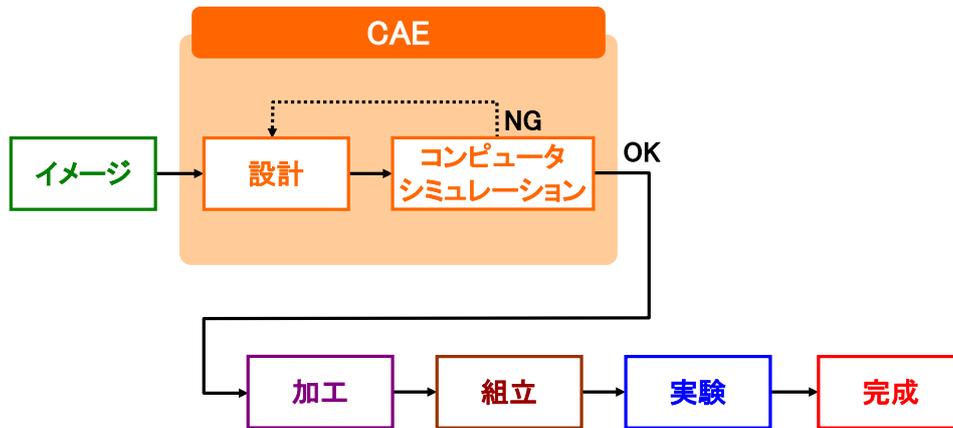


図6 CAEを用いた開発手順

3章 ロボットの基礎

この章は基本的に産業用ロボットを基礎としている。

3-1 アクチュエータ

(a) アクチュエータとは

動力源媒体のエネルギーを具体的な動きに変換するためのものをアクチュエータという。アクチュエータには直動のものと回転のものがある。前者をリニアアクチュエータ、後者をロータリアクチュエータとも呼んでいる。アクチュエータは、動きの大きさと力とが性能のうえでもっとも重要なものである。動きの大きさをストロークと呼ぶ。直動の場合は、XXミリメートルといった長さで表現し、回転の場合は、角度もしくはラジアンであらわす。アクチュエータの種類により、直動が得意なものと回転の得意なものがあるが、直動を回転に変換したり、逆に回転を直動に変換したりするために、歯車、ベルトなどが使われる。アクチュエータに要求される諸性能をつぎに示す。

- ① 小型軽量であること。
- ② エネルギー変換効率が高いこと
- ③ エネルギー媒体となるものとりあつかいが容易であること。
- ④ 保守が容易であること。
- ⑤ 信頼性が高いこと。
- ⑥ 騒音・振動がすくないこと。
- ⑦ 発熱が少ないこと。
- ⑧ 悪環境のもとでも使用に耐えること。
- ⑨ 動きを実現する部分とロボットの作動機構との接続が容易なこと。
- ⑩ ストロークのとり得る範囲の大きいこと。
- ⑪ 作動速度の変化範囲の大きいこと。とくにロボットの場合、微速作動が可能であると好都合。

ロボットの動力源として、電気、空圧、油圧、機械の四つが現在使われている。ロボット側の

動きが直動だからといっても、直動アクチュエータばかりが使われるとは限らず、またこの逆に、回転だから回転アクチュエータばかりが使われるわけではない。具体的に機構を設計する際に、個々の場合に応じて種々な方法がとられる。この選択の目安としては、つぎのような事が考えられる。

第1に、構造上望まれざる形態の生ずること。たとえば、直動であるストロークの動きが要求される場合、これを直動アクチュエータで実現するとすると、作業と反対側方向へ伸縮の不要部分が出ることになる。伸びの状態であれば不要部分はなくなるが、縮みの状態ではストローク分だけ反対方向（すなわち人間のいる側）へ突き出すこととなり、安全対策上の配慮が望まれることになる。あるときとないときがあるから人間が困るのだとなれば、鞘をつけて、いつも突き出しておこうということがひとつの解決法となるが、ストロークの長さに対応する鞘が必要となる。

第2に、アクチュエータの性能の限界からもたらされる機構。たとえば、回転の機構を実現する場合に、回転アクチュエータを使用することが困難な場合がある。回転軸にアクチュエータが直結できればよいが、プーリとベルト、もしくは歯車を介して伝達するなど、性能のわりに回転アクチュエータが割高になる場合には、直動アクチュエータを使い、伝達機構によって回転を実現すればよいのである。

第3に、機構と機能実現上の制約を多関節ロボットで考えてみる。関節ごとに、その近辺に回転アクチュエータが搭載できればよいが、そういったメカニズムが諸特性にどのように影響するか、具体的な機構を考えたとき、腕の位置の表現が多少複雑になっても、直動アクチュエータを使ったほうがよいことも十分に考えられる。

要するに、最終的にロボットの形で機構機能を実現した時点でどうなるか、そこから逆に出発して、アクチュエータを選択すべきである。希望する運動機能機構を実現するために、どのようなアクチュエータを選択して、どのような機構で動きを伝達するか、これは一義的に与えられるものではない。

電気、空圧、油圧アクチュエータのうちで、どれを選択したらよいかの基準を、大略次に示す。基本的には、動力源の比較とほぼ同様の内容になる。

- ① 必要なストロークと力の大きさ。
- ② 動作速度
- ③ 位置きめの場所。ストロークの両端だけでいいのか。任意のところで停める必要があるのか。
- ④ ロボットが使用される場所からくる制約、電気の使用、空圧の供給の可否、使用環境、など。
- ⑤ コスト

アクチュエータは、動力源的にひとつの種類のものだけが同一ロボット内で使用されるとは限らない。複数のを併用していいことはもちろんである。

直動の場合、アクチュエータは伸びの状態と縮みの状態との長さの比が、最高のもので2対1である。実際のものはこれより悪い。縮みの場合はゼロといわれる状態までいかになくとも、なるべく小さくなり、伸びの状態では、最大で無限大とみなせるものが欲しい。現状ではスペース的な効率が悪いほか、長いものを振り回して作動することになり、モーメントが制御性に影響し、対人安全策上の問題が生ずるなど、不満な点が多い。

(b) 電動アクチュエータ

電動アクチュエータは、電動機とソレノイドである。両者とも、電磁力を使用している点で共通している。ソレノイドは、一部簡易型のものに使われている程度である。安価で、可動部分が少ないという特徴がある反面、通電・非通電時間の比をある値以下にしなければならない、単位時間あたりの動作回数がある程度以下に押さえておかねばならないという欠点がある。ソレノイドは直動のものほか、ロータリソレノイドと呼ばれる回転作動のものもある。

電動機は交流機と直流機に分類され、交流機はさらに誘導機と同期機に分類される。制御方式は交流機のうち誘導機が電圧制御、周波数制御の両方、同期機は周波数制御のみ、直流機は励磁電流制御のみである。具体的な制御方式としては、電動機の種類によって個々に異なるし、同じものでも用途、目的に応じてさまざまな方法が考案されている。

電圧制御は、電動機に加えられるエネルギーの制御を電圧によって行うものであり、古くは電圧調節器で電動機に印加される電圧を調節した。自動制御はまず不可能といってよい。交流機ではサイリスタ位相制御を行うのが普通である。半サイクルごとの波を、一部分だけ切り落とすという形である。サイリスタがオフで使用されない波の部分が外部へ逆流し、ノイズとなって他の

機器に悪影響を及ぼすといった例が多いため、万全の対策をとることが望まれる。

直流機では、電圧の振幅を変更することのほか、パルス幅変調方式（PWM）と呼ばれるもある。電圧の実効値は、ピーク値にオン・オフの比を乗ずれば求まる。周波数制御の場合には、電圧制御と異なり、商用電源周波と異なった周波数が必要になるため、インバータが使用される。

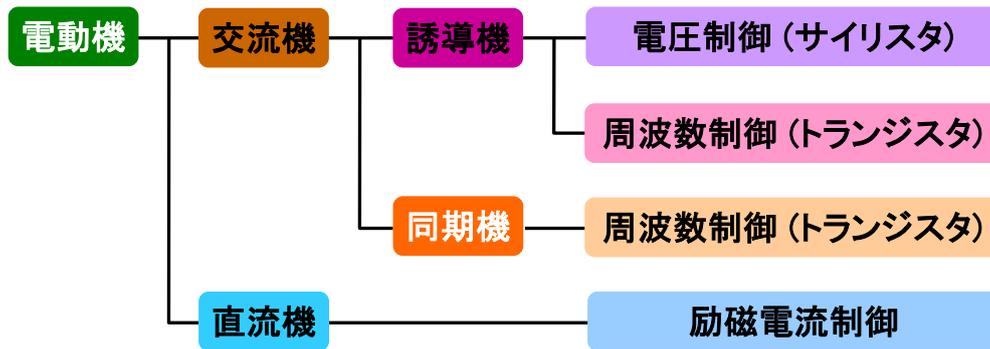


図7 電動機の種類

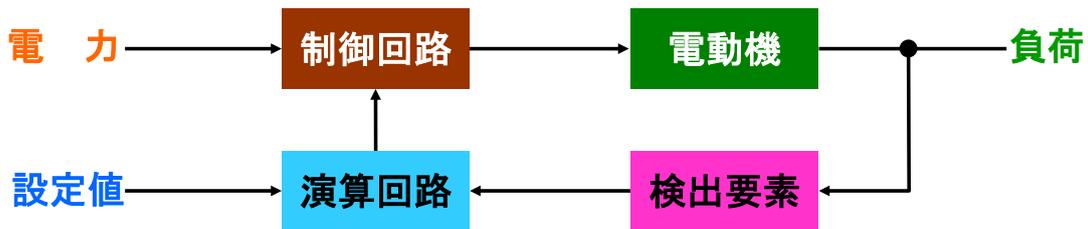


図8 アクチュエータの制御系の構成

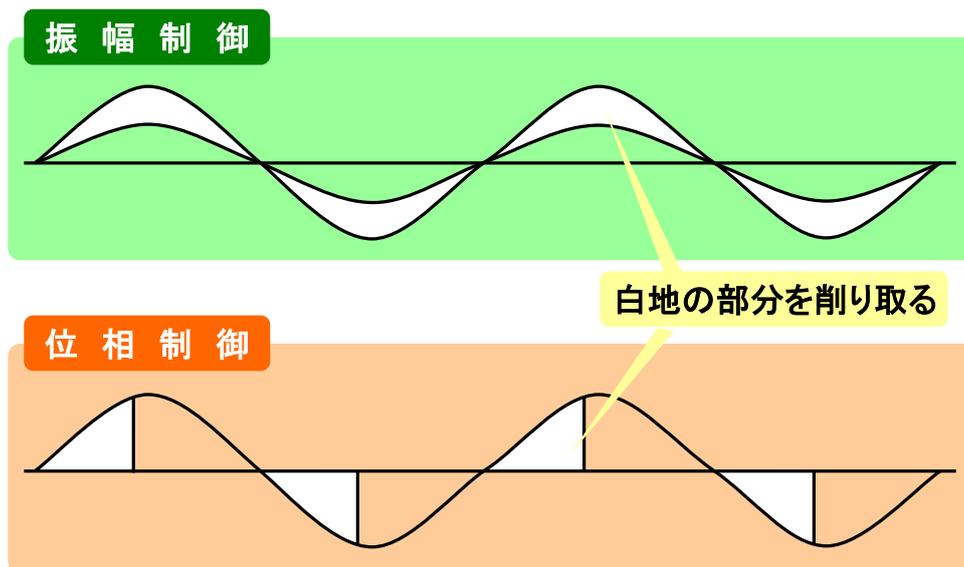


図9 交流機における電圧制御方式

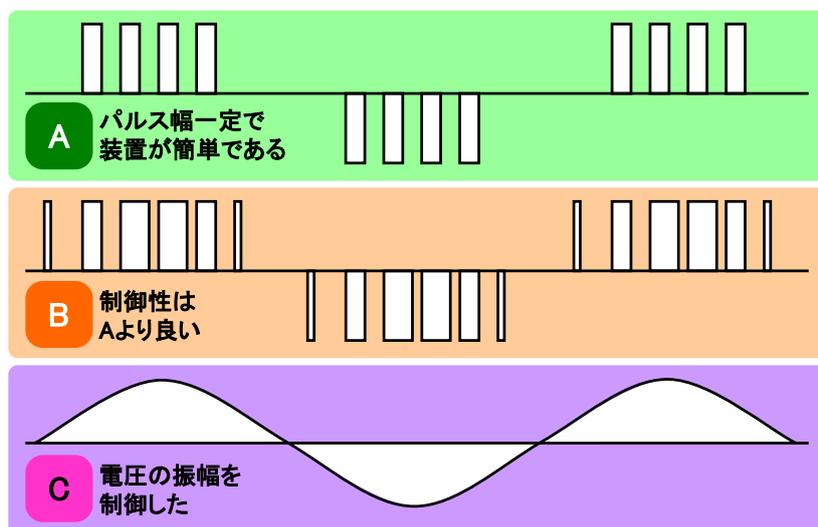


図 10 直流機におけるパルス幅変調方式

制御用電動機の特長としては、つぎのような内容が表示される。

- ① 動作原理・構造
- ② 寸法
- ③ 定格出力 (W)
- ④ 定格トルク (kg・cm)
- ⑤ 定格回転数 (rpm)
- ⑥ 定格電圧 (V)
- ⑦ 定格電流 (A)
- ⑧ 瞬時最大トルク (kg・m)
- ⑨ 瞬時最大電流 (A)
- ⑩ ロータイナーシャ (kg・cm²)
- ⑪ 電機子抵抗 (Ω)
- ⑫ 機械的時定数 (秒)
- ⑬ 電氣的時定数 (秒)
- ⑭ パワーレート (kW/秒)

これらの諸特性を以下の要求特性に照らし合わせる必要がある。

- ① 高速応答性を有すること。すなわち、パワーレートの大きいこと。
- ② 系の性能に適合したダンピング特性を有すること。
- ③ 高すぎもせず、低すぎもしない電氣的時定数を有すること (停止・逆転の制御性の向上)
- ④ 過渡時のピーク負荷に耐えられること。
- ⑤ 回転むら、トルクむらのすくないこと。
- ⑥ 信頼性が高いこと (機械的、電氣的)。
- ⑦ 保守が容易であること。
- ⑧ 速度の検出が容易であること。
- ⑨ 消費電力が小さいこと。

これらの諸特性をすべて満足させるような電動機をつくるのは容易ではない。とくに、パワーレートを大きくするため、回転子の抵慣性モーメント化に努力が払われ、直径を小さくして長くしたもの (磁氣的特性が若干損なわれる)、回転子から鉄心をなくしたもの (コアレスモータなど) などが出現している。しかし、負荷として慣性モーメントの大きなものが接続されると、このような努力の効果は低減されてしまう。また、負荷に比較して大きな容量のものを使用すれば、高速応答性の効果は現われるが、エネルギー消費の点から勧められない。

電動のサーボ制御アクチュエータとしては、現在ではパルスモータも使われるが、制御装置の構成が複雑になり、脱調 (制御不能になり暴走する) のおそれもあるため、直流機を使ったものが

多い。制御装置を構成する技術上の問題と、電動機そのものの特性とがこの理由である。今後は、交流機の制御装置構成の技術が進歩するにつれ、交流機化の方向へ進むと考えられる。

(c) 空圧アクチュエータ

空圧アクチュエータは比較的簡単な構成のロボットに多く使用される。このようなロボットは、動作の自由度における位置に位置決めすることが困難で、両端点のみでしか作業ができない。つまり、位置決めのための自由度が3であれば、作業点は2の三乗すなわち8だけとなる。単純な搬送作業などには、これだけで十分なものも結構多く、このようなものは制御装置も簡単な構成で済むために、価格も安く、操作、保守も容易である。

最近、空圧サーボ機構と称する、動作の自由度のストロークにおいて、任意の位置で位置決めできるものも一部で使われるようになった。ただ、空気の圧縮性が特性に大きく影響するという点が、油圧の場合と異なる。ロボットだからといって、他の空圧機器とは異なったアクチュエータが使われるわけではなく、一般の空圧機器とはまったく同じものが使われる。直動のアクチュエータ（エアシリング）が圧倒的に多く、回転のアクチュエータはあまり使われない。エアシリンダの動きをラックーオピニオンで回転動作に変換することが多いのは、古くから多く使用されてきたエアシリンダの実績の積み重ねに、ユーザーが圧倒的な信頼感を抱いているからである。

(d) 油圧アクチュエータ

油圧の場合は空圧の場合とは対称的に、サーボ機構の動力として使われるのが一般であり、当て止めのに使われるのはごく少数の例外に限られる。したがって、比較的高度なロボットに使われる。とくに作動領域の大きいもの、高速作動のものは、すべてが油圧作動方式であるといつてよい。もっとも、油圧作動とはいっても、アクチュエータだけに限られ、アクチュエータを作動させる動力源媒体の制御は、ほとんどの場合、電気に頼っている。空圧の場合は、空圧演算素子が使われることもあったが、ロボットに関しては油圧の場合にそのようなものはなく、電気—油圧サーボ機構と呼ばれるのが普通である。

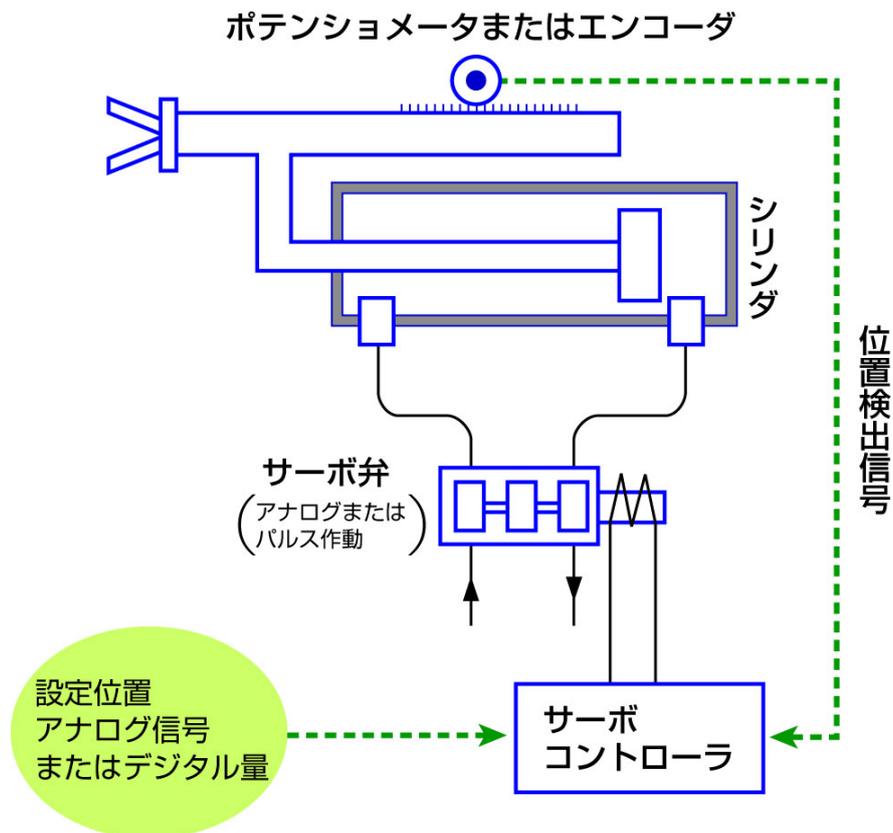


図 11 油圧サーボの構成

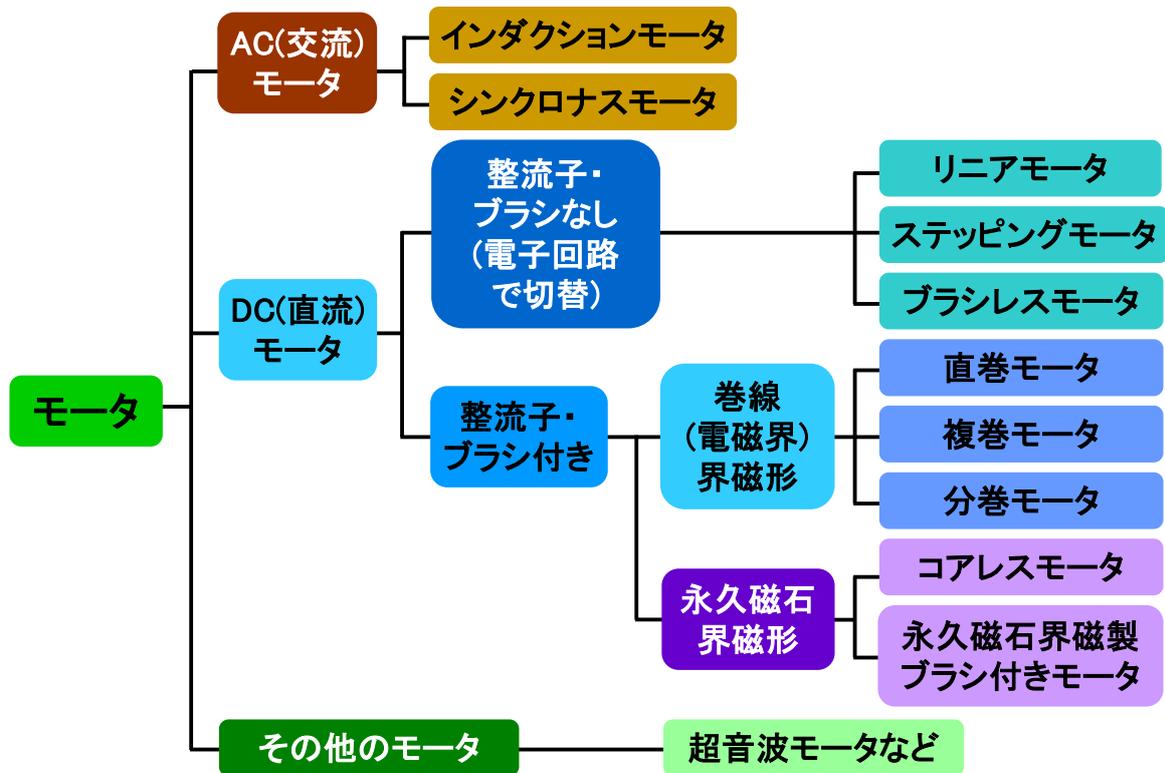


図 12 モータの分類

3-2 DC モータ

(a) 特徴

DC モータは直流 (DC) 電源をエネルギー源とするモータで、家電製品や自動車など私たちの身近に多く存在するモータである。一般的に DC モータは大きな起動トルクや印加電圧に対するリニアな回転特性、出力効率の高さ、低価格など制御用のモータとして優れた特性を持っている。しかし、ブラシ (brush) や整流子 (commutator) などの機械的な接点があり、整流時のスパークや騒音、短寿命などという欠点もある。

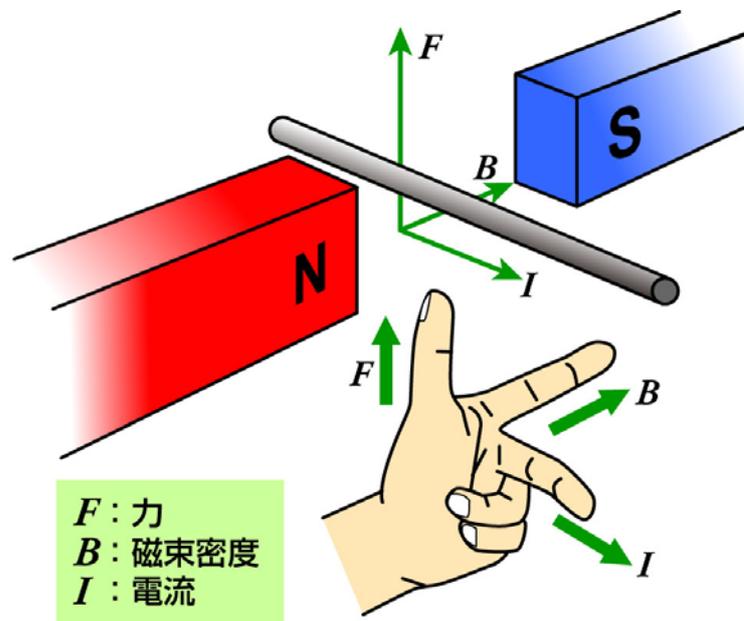


図 13 フレミング左手の法則

(b) 動作原理 (永久磁石型)

DC モータの動作原理はフレミングの左手の法則に基づく。この法則は磁束密度 B の磁場で、その磁界を横切るように置いた長さ L の電線に電流 I を流すと、電線に対して力 F が発生するというものである。この力の強さは次式のようになる。

$$F = BLI$$

磁束密度 B の単位 T (テスラ) は国際単位 (SI) であり Wb/m^2 と同じである。1T は 1cm^2 当たり 1Wb の磁束による磁界の強さである。また磁石メーカーや仕様書でよく使われる単位として G (ガウス) がある。1T は 10 000G である。DC モータは、電線をコイルにして電流 I を流すとコイルの両端に上下異なる向きの力が発生して、コイルが回転する。しかしコイルが一組では永久磁石の中間の位置にきたとき、どちらに回るか決まらなくなる。そこで、電機子 (armature) の極数によって、2 極モータ、3 極モータなどがある。

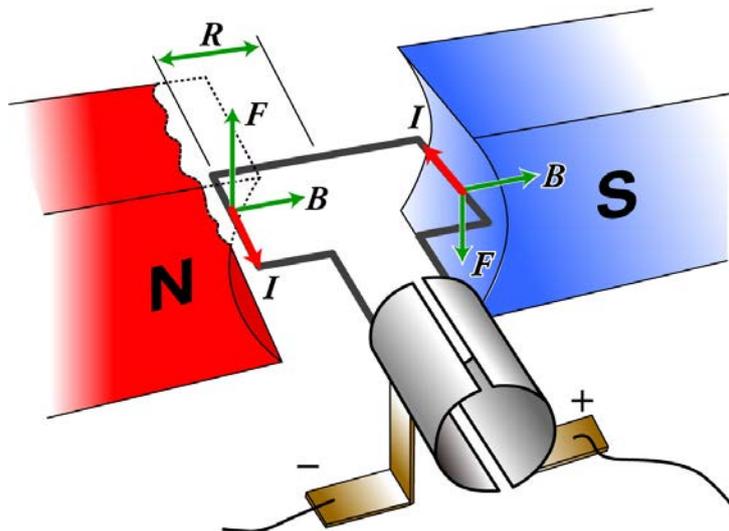


図 14 モータが回転する原理

(c) 種類

① 永久磁石

永久磁石型モータは、「入力電流とトルクが正比例する」という特徴があげられる。電磁力は磁界の強さ B と電流の大きさ I に比例する。磁束密度 B の磁界を発生させるステータに永久磁石を用いると、磁界の強さは一定であり、トルク T は電流の大きさ I に正比例する。このトルクと電流の関係は直線で表すことができる。このような特性を線形 (リニア) であるという。

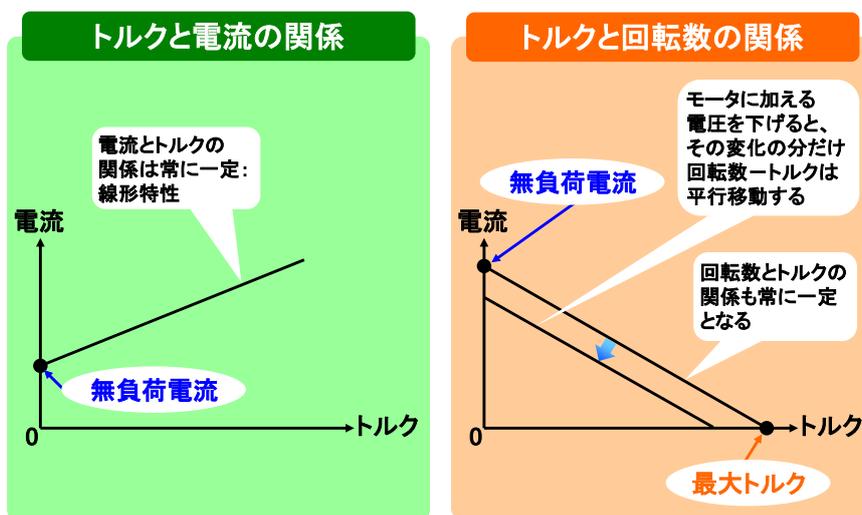


図 15 永久磁石型モータの特性

次の特徴は、「トルクと回転数が反比例する」ことである。負荷（load）がかからない状態でのモータ回転を無負荷回転といい、このときの回転数を無負荷回転数、電流を無負荷電流という。トルクと回転数の関係も直線で表せ、回転数とともに線形にトルクが減少する。また、モータに加える電圧を変化させることによって、直線が平行移動する。このようにトルクと電流、トルクと回転数、回転数と電圧など、すべての特性が線形であり理論的に取り扱いやすく、制御しやすいモータである。

しかし、DC モータは回転する部分であるロータに鉄心を使用しているため、慣性モーメントが大きいという欠点もある。また、鉄心にはコイルを巻くためのステータとロータの間に溝（スロット）があり、回転角度によっては磁束密度に偏りがでて、発生トルクにむらが生じる。これは高速回転時では目立たないのだが、低速回転になるとモータがガクガクとした動作になる。

② コアレスモータ

一般的な DC モータは、強い磁力を得るためにロータに鉄心を用いている。しかし先に述べたように、鉄心の使用にはロータの慣性モーメントが大きくなったり、渦電流や鉄損と呼ばれるロスが発生する。そこでロータに鉄心を用いなくて、コイルのみでロータを成形したモータをコアレスモータという。コアレスモータは鉄心を用いるモータに比べ、ロータが軽く、スロットもないのでコギングが少ない。また、渦電流もないため、エネルギー効率もよい。さらに、ロータがコイルで成形されているので、数 mm 径のモータや薄型のモータなどさまざまな形のモータを作ることができ、超小型化が可能である。また、コアレスモータは鉄心がないために、大きなトルクは発生できないが応答が速く、小出力用のサーボ制御用のモータとして広く使われている。

③ ブラシレスモータ

DC モータにとって整流子やブラシはなくてはならないものだが、機械的な接点による欠点も多いことはすでに述べた。そこで、コイルに流す電流の切換を電子回路で行い、機械的接触部分をなくしたものがブラシレスモータである。

ブラシレスモータはステータにコイル、ロータに永久磁石が使用されており、ブラシ付きの DC モータとは逆の構造をなしている。ステータの各相に流す電流を順次切り換えることで界磁を回転させ、永久磁石でできたロータがそれに引かれて回転する。

この仕掛けをうまく動かすためには、回転しているロータの磁極の位置に合わせて、ステータコイルを正確に切り換えなければならない。その方法として磁気センサや光センサを使う。磁気センサとしては、ホール素子やホール IC を使う磁気検知方式や高周波発振方式がある。光学センサとしてはスリット円板とフォトインタラプタを組合せたロータ磁極検出方式がある。しかし、これらのセンサを使用しないセンサレスブラシレスモータもある。

ブラシレスモータは機械的な接点がないため、音が静かで寿命が長く、高速回転に適している。しかし、ブラシ付き DC モータのように単体で使用することはできず、ステータコイルに流す電流を切り換える電子回路が必要となる。このような特徴からブラシレスモータはパソコンのハードディスクドライブや、CD、CD-ROM などのスピンドルモータ、冷却ファンのファンモータなどに使用されている。

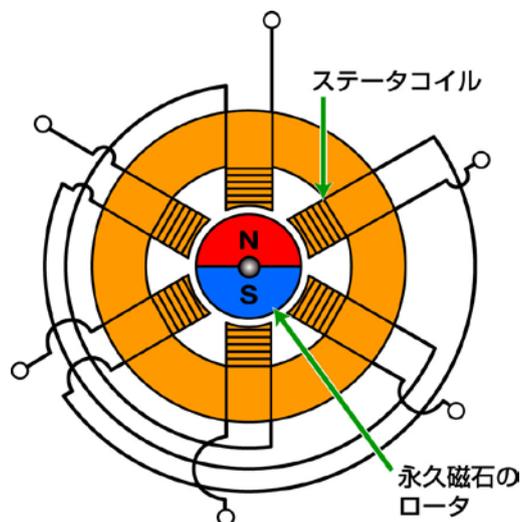


図 16 ブラシレスモータの構造

④ ステッピングモータ

ステッピングモータはDC電源により滑らかに回転するこれまでのモータとは違い、パルス状の電力を与えることで一定の角度ずつ動いては止まるモータである。DCモータの動作原理で、ロータの電流を切り換えないとロータとステータが引き合い、そこで止まってしまうことは説明した（そのために整流子とブラシが存在した）。しかしステッピングモータは逆にステータとロータが引き合って安定するという原理を使ったモータである。

ステッピングモータの最大の特徴は、パルス状の電力によって動作することにある。そのため、回転速度はパルスの周波数に比例し、入力パルス数に比例した角度だけ回転する。したがってフィードバック系を用いることなく、オープンループでの位置決め制御を可能にする。このような位置決め制御をステッピングモータ以外のモータで行おうとすると、必ずフィードバック制御が必要となる。このようにステッピングモータは位置決め装置の駆動源として、簡易であり広く用いられている。

⑤ ギヤードモータ

一般的にモータは高速回転するように設計されている。そのため、これを動力として使用する場合、歯車などで減速して使うことが多い。そのような減速機構とモータを一体化したものがギヤードモータである。

ギヤードモータでは、平歯車を組合せたもの、遊星歯車機構が採用されている。幅広い用途に適用できるよう、さまざまな減速比やサイズのものがある。平歯車を用いた減速機構は、歯車を押し付ける力がモータ軸に垂直（ラジアル方向）に作用し、大トルクのもとで動かすとモータ軸への垂直荷重が大きくなり、モータに振動が発生したり、寿命が短くなったりする。遊星歯車機構は、モータ軸と出力軸が同一直線上にある減速機構である。この機構は、数個の歯車がかみ合っていることから、かみ合っている歯の枚数が多く、効率よく力を伝えることができ、何段も重ねることで大きな減速比を得ることができる。また平歯車のように、モータ軸に直角に加わる力も小さくなく、モータに余分なストレスを与えない。

3-3 ACモータ

(a) 動作原理

交流電源には、工場などで使われる三相交流と、一般家庭で使われる単相交流の二つがある。ACモータには、三相交流でも単相交流でも駆動するものがあるが、基本となるのは三相交流用モータである。三相交流でモータが回転するしくみは、三相の交流が120度ずつ、位相がずれていることを利用している。

ここでは、最も構造がシンプルなシンクロナスモータを例に説明する。シンクロナスモータのステータは、120度の角度で向かい合う一組のコイルが巻かれている。それぞれのコイルは、三相交流電源につながれており、120度位相が違う電流が流れている。この三つのコイルによってできる磁界は、変化する電流の大きさと方向によって刻々と変わり、電流のピークで強さが最大になり、流れが反対になるとその極性も反対になる。ACモータは、DCモータのように整流子とブラシでロータの磁極の向きを変えるのではなく、位相が120度ずつ異なっている（ずれている）三相交流電源の性質をうまく利用している。

(b) 種類

① シンクロナスモータ

シンクロナスモータは先に述べたように、電源周波数によって決まる回転磁界と同じ速度で回転するモータである。回転磁界とロータの回転がシンクロ（同期）しているために、シンクロナスモータといわれている。シンクロナスモータはロータの違いによって、永久磁石を使ったマグネット型、コイルが巻いてある巻き線型、鉄などの強磁性体を使用したリラクタンス型の三つに分類される。マグネット型やリラクタンス型モータは、整流子やブラシといった機械的な接点がないため、騒音もなく、メンテナンスの必要もないので、寿命が長い。

最近では、SRモータ（SRM: switched reluctance motor）というモータも登場している。SRモータは、回転磁界に同期して回転するが、他のモータの特徴も併せ持っているモータである。SRモータは、効率が90%以上と効率のよいモータである。また、同じサイズのシリーズモータと比較すると、起動トルクで約4倍、通常の回転トルクで3~4倍である。サイズ当たりの出力が大きい、さらに、高価な永久磁石やコイルを使用しない単純なロータ構造のため、安価で小型・軽量・高速・高トルクで可変速運転が可能なモータである。

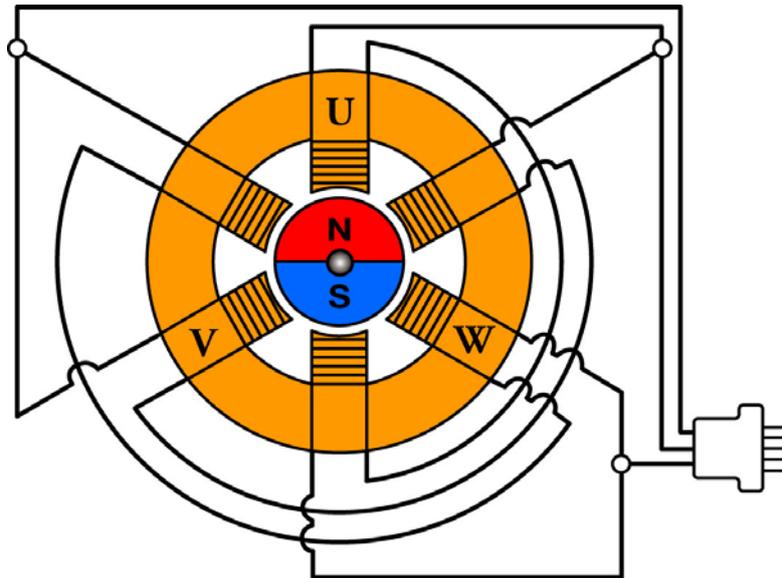


図 17 シンクロナスモータ

② インダクションモータ

インダクションモータは、かごのような導線からなるロータに、電磁誘導により別の磁界を発生させ、回転するモータである。インダクションモータも、回転数は電源周波数に依存するが、ロータの回転はステータの回転磁界よりも少し遅れる。フレミングの右手の法則で説明したように、磁界の中に置かれた導体が動くと、その導体には電流が流れる。インダクションモータの磁界と導体の相対運動は、導体が止まり、磁界が動いているのである。

この場合でもかご型の導体に流れている誘導電流による磁極が生じ、この磁極とステータの作る回転磁界の間でフレミング左手の法則が成り立ち、電磁力が作用しロータが回転する。

かご型の導体に流れる誘導電流によって磁極が生じるためには、常に誘導電流を流しておかなければならず、ロータが回転磁界よりも少し遅れて回転することが必要である。この回転速度の差を滑り(slip)という。多くのインダクションモータは、積層鉄心などの強磁性体のコアに、かご型導体が埋め込まれている。これにより導体の周囲の磁束密度が高くなり、磁気による誘導電流も大きくなる。重いが効率のよいモータである。

引用文献：「ロボット入門」 オーム社

引用文献：「産業用ロボット入門」 大河出版