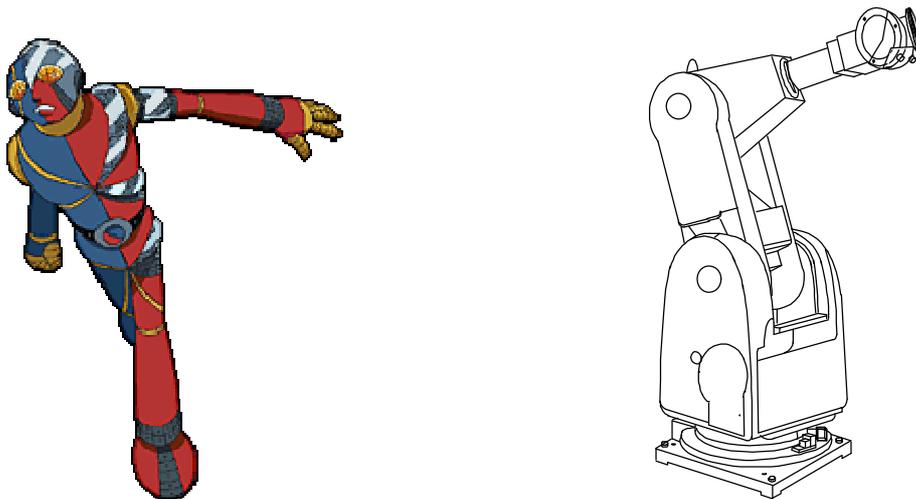


ロボットテクノロジー

0. はじめに

ロボットといえば，私たちは図に示す [アニメ] 人間のようには頭，胴体，手足を持ち行動する機械を思い浮かべるが，最初にロボットとして開発され普及したのは図に示す産業用ロボット [アニメ] と呼ばれるマニピュレータ，すなわち，ロボットの手腕部である．マニピュレータの手，すなわちハンドには使用目的に応じて様々な形式が用いられる．しかし，アーム部分は多くのロボットにおいて共通である．したがって，ロボットに関する学問の体系化も，主としてロボットのアームを対象として発展した．そこで，本編でもロボットとして，特にアーム部の機構，運動について学ぶ．ロボットのアーム部の機構，運動は，ロボット全体の機構，運動の基礎部分であり，これらに関して得られる知識は，ロボットのハンドや，脚の機構，運動をさらに学習・研究する場合にも必須である．



1. ロボットのメカニズム

1.1 ロボットの構成

図 1(a)は一般的な産業用ロボットである．ロボットの外観は複雑であ

るが，その機構形式および運動は図中に破線で示した骨格に相当する部分で表される．そこで，本編では，ロボットを図 1(b)のような概略図を用いて表す．

図 1(b)で示すように，ロボットは実線で示した複数のリンク (link) または節と呼ばれる剛体を連結して構成される．その連結は，リンクが互いに相対的な運動が可能となるように，軸や軸受などを組み合わせて行われる．このように相対的に運動可能となるように結合されている部分をジョイント (joint)，対偶(pair)などと呼ぶ．ジョイントは，複数の要素で構成される可動部であることに注意しよう．

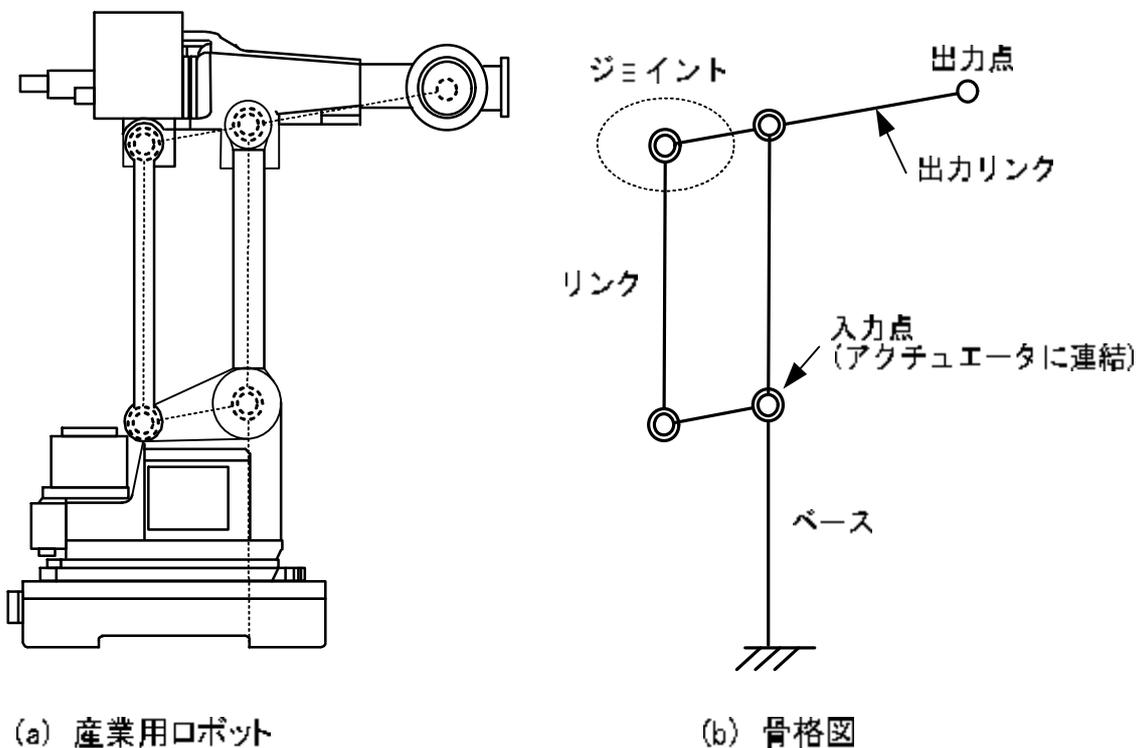


図 1. 1 ロボットの骨格

ジョイントには，リンクとリンクの間にアクチュエータを設置し，能動的に運動するものと，軸と軸受などにより複数のリンクを連結し，他のリンクの運動に応じて受動的に運動するものがある．本編では前者を

能動ジョイント，後者を受動ジョイントと記す．図 1. 1(b)では，入力点と記した部分がアクチュエータに連結される能動ジョイントであり，他のジョイントは受動ジョイントである．

ロボットの先端には，物体の把持や，塗装など，外部に対して何らかの働きをするエンドエフェクタ（end effector）が装着され，他の一端は床，天井などに固定される．本編ではエンドエフェクタを取り付けて作業を行う部分を出力点（output point）と記す．また，出力点が存在するリンクを出力リンク（output link）または出力節と呼ぶ．本編では，また，出力リンクおよび出力点をあわせて出力部と記す．さらに，固定されるリンクはベース（base）または静止節（fixed link）と呼ぶ．ベース以外のリンクを動節または可動リンクと呼ぶ．

1.2 ジョイントの種類

ロボットのジョイントには，回転運動を行う回転ジョイント（rotary joint, revolute joint），直進運動を行う直進ジョイント（prismatic joint, sliding joint）もよく用いられる．図 1. 1 のロボットは回転ジョイントで構成されている．本編では回転ジョイントを，図 1. 2(a)の記号で，直進ジョイントを図 1. 2(b)の記号で表す．

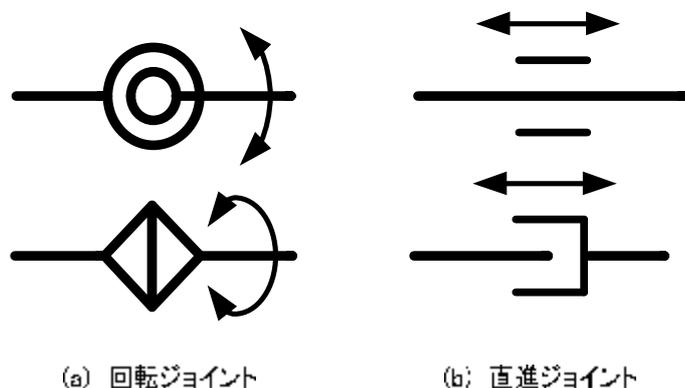


図 1.2 ロボットのジョイント

写真1に回転ジョイントを示す。回転ジョイントは、メンテナンスが容易で、コンパクトであることから、ロボットに多用される。ただし、回転ジョイントを用いて連結されたリンクどうしは、図1.3(a)のように軸方向にオフセットをとらなう。同部分は片持ちはり状態となり、大きなモーメントが生じて、変形や破壊の原因となる。そこで、図1.3(b)に示すように両持ちはり構造とするなどの工夫が行われる。ただし、両持ち支持とする場合、リンクの回転範囲が制限されるので注意が必要である。



写真1 ボールベアリング (NTN)

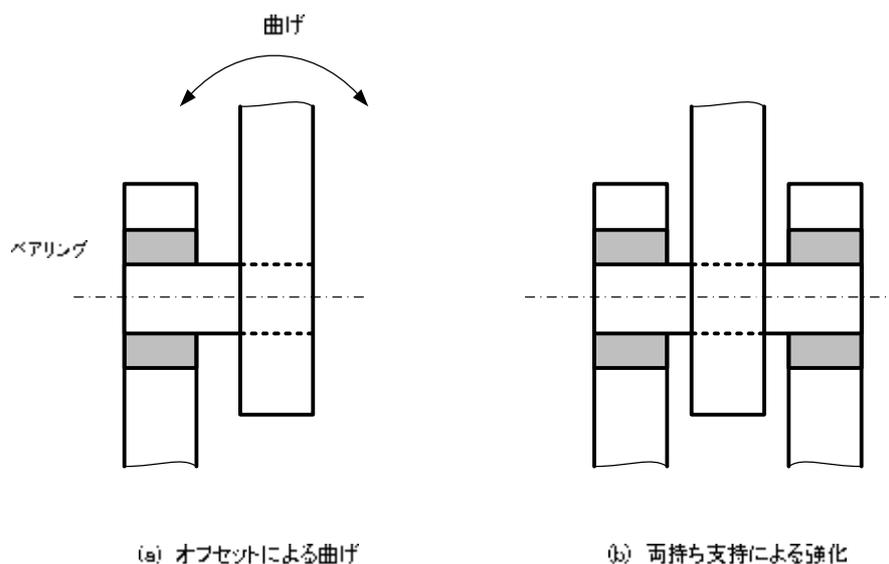


図1.3 オフセットによる曲げとその対策

直進ジョイントには写真に示すボールねじ、リニアガイドなどがある。直進ジョイントは、わずかなゆがみで運動が妨げられること、接触部の

メンテナンスが煩雑であることから，以前はその使用は躊躇することもあったが，最近では高性能で優れた機能を持つ製品が多数開発されロボットに多用されている．



ボールネジ (THK)



リニアガイド (THK-SHS)

写真2 直進ジョイント

図 1. 4(a)に示すジョイントは，直交する 3 軸周りの回転が可能であり，ボールジョイントまたは球対偶と呼ばれる．回転ジョイントおよび直進ジョイントの運動はそれぞれ，平面内の 1 軸周りおよび 1 軸方向に限定されるが，ボールジョイントの運動は平面内に拘束されず多軸方向であり，複雑な運動を行うロボットに用いられる．本編ではボールジョイントを図 1. 4(b)の記号で表す．

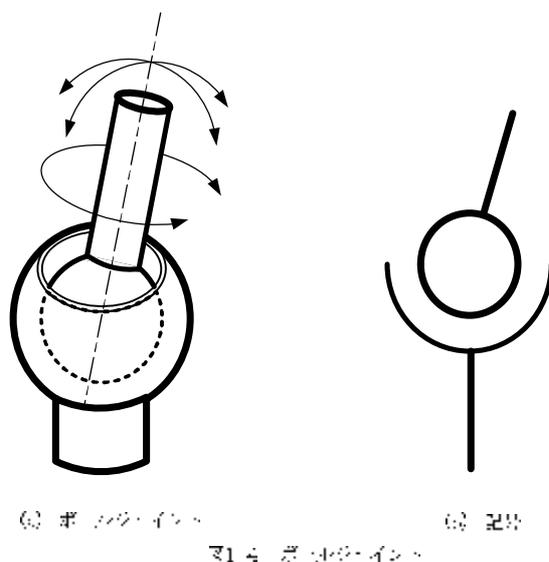


図 1.4 ボールジョイント

なお，本編ではロボットのジョイントを構成するものとしてアクチュエータも含める．アクチュエータはあるリンクまたはベースに配置され，減速機や，他の機構を介して連結される他のリンクを駆動する．したがって，同部分は相対的な運動が可能なジョイント，すなわち，能動ジョイントとなる．

1.3 ロボットの基本的な形式と特徴

以上で述べたジョイントとリンクを組み合わせるによりロボットの形式が決定される．その特徴はジョイントの種類に大きく左右される．そこで，本書ではジョイントの種類に対するロボットの特徴をまとめ表 1.1 に示す．

表1.1 ジョイントによるロボットの特徴

| | 剛性 | 制御 | 占有空間 | 作業領域 | 保守 |
|---------|----|----|------|------|----|
| 回転ジョイント | 劣 | 劣 | 優 | 優 | 優 |
| 直進ジョイント | 優 | 優 | 劣 | 劣 | 劣 |

直進ジョイントを用いたメカニズムに作用する負荷は引張・圧縮であ

ることが多く、回転ジョイントでは曲げであることが多い。一般に、機械材料は引張・圧縮負荷に対する変形は生じにくいだが、曲げに対しては大きな変形を生じやすい。したがって、直進ジョイントを用いたロボットは剛性が高い場合が多い。また、直進ジョイントでは入出力関係が線形となり制御が容易であるが、回転ジョイントでは入出力関係が三角関数などで表される非線形関係となるため制御は複雑となる。しかし、直進ジョイントは、可動部分となるレールなどの軌道を設置するために大きな空間を占有し、干渉が生じやすくなり、障害物を回避する姿勢をとりにくいなど、占有空間および作業領域に関して不利となる。これに対し、回転ジョイントは、可動部分がいわば円の無限軌道であり、省スペースで連結されたリンクを広い領域で運動させることができる。また、直進ジョイントは前述のとおり、可動部分の防塵、変形に注意しなければならず保守の点で回転ジョイントに劣る。

具体的なロボットの形式を以下に示そう。ロボットは出力点の位置の表現方法に基づき、図 1.5 のように直角座標、円筒座標、極座標、関節ロボットとして分類される⁽¹⁾。例えば図 1.5 の直角ロボットでは、出力点の位置が直交座標系の変数である x, y, z で、関節ロボットでは、関節の角変位 $\theta_1 \sim \theta_3$ で表される。これらの中で、直角座標ロボットは直進ジョイントで構成され、関節ロボットは回転ジョイントで構成される。したがって、直角座標および関節ロボットは、表に示した直進および回転ジョイントの特徴をよく示す。

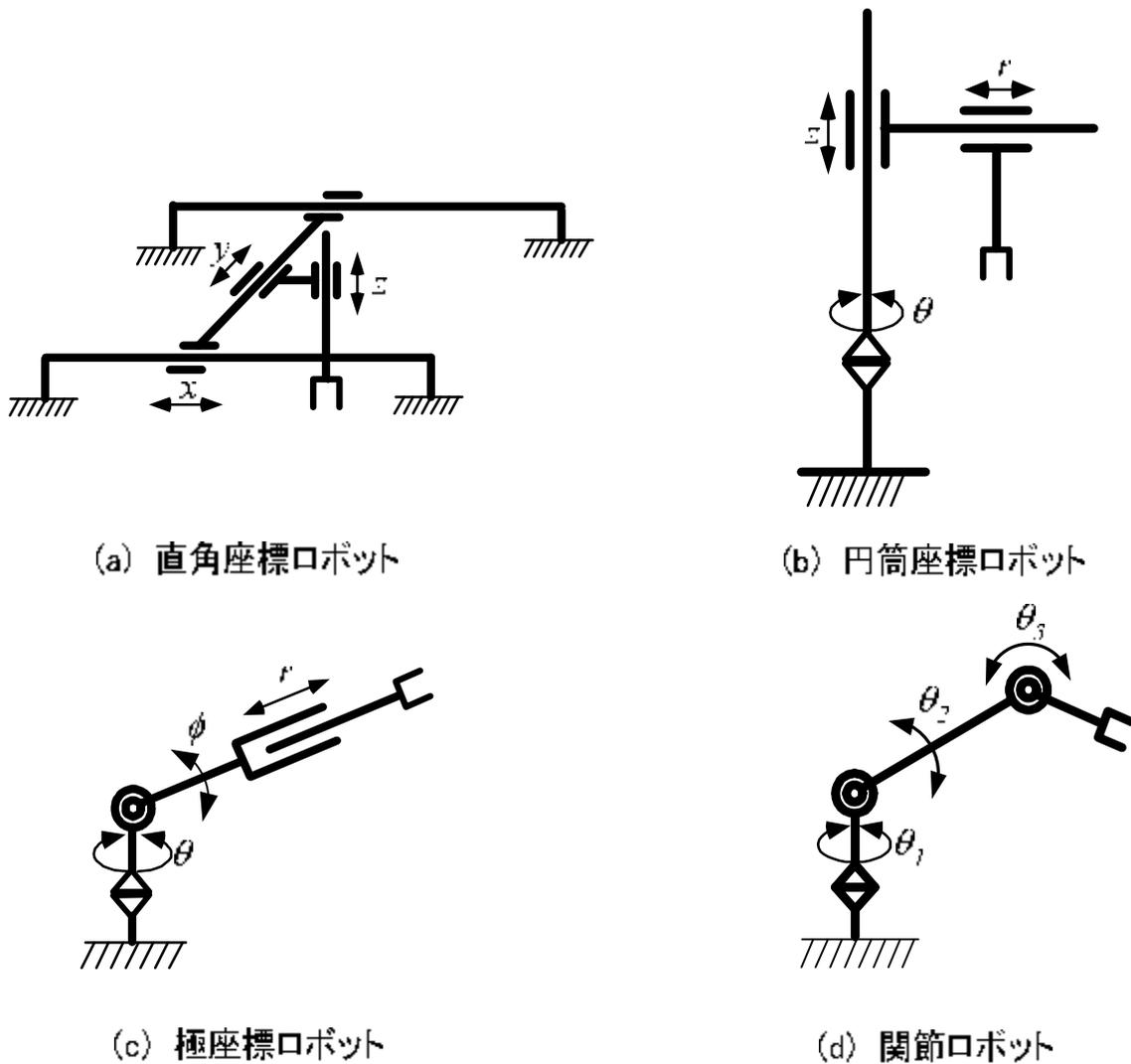


図 1. 5 ロボットの基本形式

円筒座標ロボット，極座標ロボットは直進ジョイントおよび回転ジョイントを両方用いたロボットであり，図 1. 5(b)，(c)に示すとおり円筒座標ロボットでは直進ジョイント，極座標ロボットでは回転ジョイントが多く用いられる．したがって，これらのロボットの特徴も円筒座標ロボットでは直進ジョイントの特徴が，また，極座標ロボットでは回転ジョイントの特徴が比較的強い．

具体的に，直進ジョイントを用いる直角座標ロボット，円筒座標ロボットは，直進ジョイント部分の入力変位と出力変位が線形関係となり，

制御，位置決めが行いやすい．また，直進ジョイントでは主に引張・圧縮負荷が作用するため変形が少なく，結果として高剛性が期待できる．しかし，図 1.5 (a)，(b)に示すように，ロボットに要求される出力変位と同じ長さの直進ジョイントを必要とし本体の占有空間が大きく，図 1.5(c)，(d)のロボットと比べれば，障害物の背面などにある物体をまわりこんで把持することは難しい．

これに対して，回転ジョイントを主に用いる極座標ロボット，関節ロボットは，本体の占有空間が少なく障害物回避など柔軟な運動が行いやすい．しかし，回転ジョイントの角変位と出力部の変位は三角関数などを用いた非線形関係となるため，制御，位置決めは困難である．また，リンクが片持ちで支持され，支持部には大きなモーメントが作用するため剛性は低い．

産業ロボットとしては，その初期において制御のしやすさから直進ジョイントを用いたロボットがよく用いられていた．しかし，制御機器の発達にともない，本来ロボットに求められる柔軟な作業が行える，回転ジョイントを用いた関節ロボットが主流となっている．本編においても，関節ロボットを主な対象として取り上げていく．

1.4 関節ロボットの分類

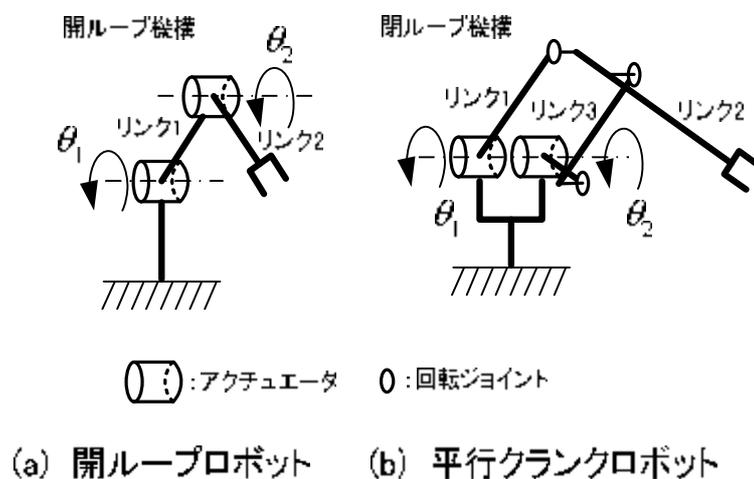


図 1.6 関節ロボットの種類

関節ロボットは用いる機構により，図 1.6 に示すように分類される．図 1.6(a)のように，リンクがアクチュエータを配置したジョイントを介して直列に連結される機構を開ループ機構またはシリアル形式の機構と呼ぶ．本書では開ループ機構を用いたロボットを開ループロボットと記す．開ループロボットは最も人間の腕や，脚に類似した形態であり，本体面積に対して作業可能な領域が広く，また，他の物体と干渉せずに様々な作業を行いやすいことから広く用いられている．しかし，同ロボットは可動リンク上にアクチュエータを配置しなければならないため，可動部の質量が大きく，ベース付近のリンクおよびアクチュエータに大きな負荷が作用する．また，構造も全体として片持ちばり構造であるため，剛性が低くなりやすい．

図 1.6(b)のロボットは，リンクの一部がループを構成している．図 1.6(b)のような機構を閉ループ機構またはパラレル形式の機構と呼ぶ．ロボットに用いられる閉ループ機構は図 1.6(b)の平行クランク形機構が多い．本書では平行クランク形機構を用いたロボットを平行クランクロボットと記す．平行クランクロボットは，リンクを動かすアクチュエータを全てベース上に配置できる．すなわち，図 1.6(a)のロボットでは，リンク 2 をリンク 1 上に配置したアクチュエータによって運動させるが，図 1.6(b)のロボットではリンク 2 を，ベース上に設置したアクチュエータにより，リンク 3 を介して運動させる．そのため，閉ループロボットは開ループロボットに比べて可動部の重量が小さい．また，リンク 3 には構造上，引張圧縮負荷のみが作用するため，低強度な部材を用いることができる．リンクの長さの比にもよるが，一般には開ループロボットに比べて高剛性で位置決め精度に優れている．ただし，平行クランクロボットでは閉ループ部分が周囲の物体と干渉しないよう考慮しなければならない．また，開ループロボットに比べて，作業可能な領域が小さい．また，

リンク数も多く,さらに,リンク間の平行が厳密に要求されることから,ロボット自身の製作コストが高くなるところが欠点である.

1. 5 その他の代表的なロボット

その他,よく用いられているロボットの形式を以下に示そう. 図 1. 7 のスカラロボットは日本で開発されたものであり, 図 1. 5(d)の開ループロボットの主な作業領域が水平となるように設置されたものである. 同ロボットは作業する面が水平方向となることが多い組み立て作業に適する. また,スカラロボットは,構造上,作業を行う水平面内での剛性が比較的低い. したがって, 図 1. 8 に示すように穴などに部品を挿入する場合,部品の中心と穴の中心位置にわずかな位置決め誤差が生じても,部品が穴に挿入されるよう,ロボットハンドの位置がジョイントの弾性変形により変化し,部品をスムーズに挿入できるとされている().

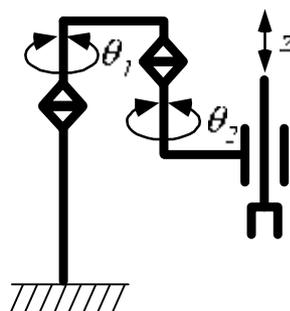


図 1. 7 スカラロボット

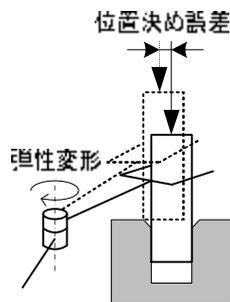


図 1. 8 スカラロボットによる部品の挿入

図 1. 9 のロボットはパンタグラフ機構を用いており, 本編ではパン

タグラフロボットと呼ぶ。パンタグラフロボットはベース上に設置される直進ジョイントで駆動される。例えば、互いの直進ジョイントの運動方向が直交するように設定することにより平面内で2自由度の運動が行える()。また、いずれかの直進ジョイントを紙面垂直方向に駆動可能とすれば直交3軸方向の運動も可能である()。パンタグラフ機構は直角座標ロボットと同じく、入出力関係が線形であるため制御が容易である。さらに、同機構では直進ジョイントの入力変位は拡大され出力部の変位となるため、直角座標ロボットに比べて、直進ジョイントの寸法を小さくできる。入力部を除く機構全体は回転ジョイントで構成されるため、関節ロボットと同様に、占有空間が少なく柔軟性の高い作業が行える。さらに、平行クランクロボットと同じく、アクチュエータをベース上に配置できるため、可動部の重量は小さい。このようにパンタグラフ機構は関節ロボットと直角座標ロボットの利点をあわせもつ。そのため、複雑な制御、柔軟な運動、コンパクトな本体が要求される歩行ロボットの脚として用いられている()()。

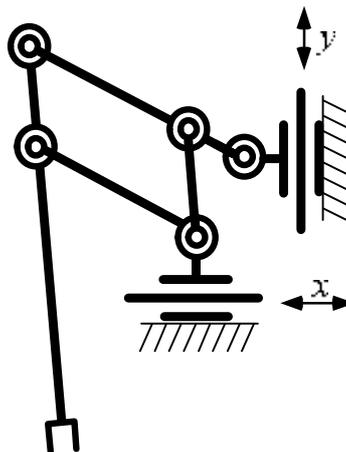


図 1.9 パンタグラフロボット

図 1.10 に示すロボットは、平行ロボット、平行マニピュレ

ータなどと呼ばれ，閉ループ機構の 1 種であり，近年注目されているロボットの形式である(1)。図 1.10 に示すように機構部分には複数の閉ループ部分が存在する．そこで，同機構を復ループ機構とも呼ぶ．平行ロボットはプラットフォームと呼ばれる板状の出力リンクを複数の連鎖でベースと連結する．ベースと連鎖とのジョイント部にはアクチュエータが配置される．したがって，平行ロボットは平行クランクロボットと同じく，可動リンク上にアクチュエータなどを配置する必要がないので，可動部の軽量化が図れる．また，出力リンクを複数の連鎖で支え駆動するため，高出力，高剛性である．また，開ループロボットでは各ジョイントの入力誤差が累積されて出力点の誤差となることに対し，平行ロボットでは，入力部となる能動ジョイントの誤差は出力リンクにおいて平均化される．したがって，高精度な位置決めが可能である．

しかし，出力リンクの移動可能な領域はロボット全体の大きさに比べて小さく，領域の形状も複雑である．そこで，これらの欠点を補うためにハイブリッド形式の機構なども検討されている(2)。

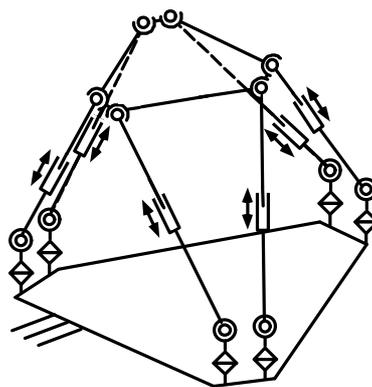


図 1.10 平行ロボット

1.6 自由度

ロボットが出力部を，どの程度自由に動かせるかは，組み合わされるジョイント，リンクの構成によりほぼ決定される．このようなロボットの運動の自由さを表す数値として自由度が用いられる．

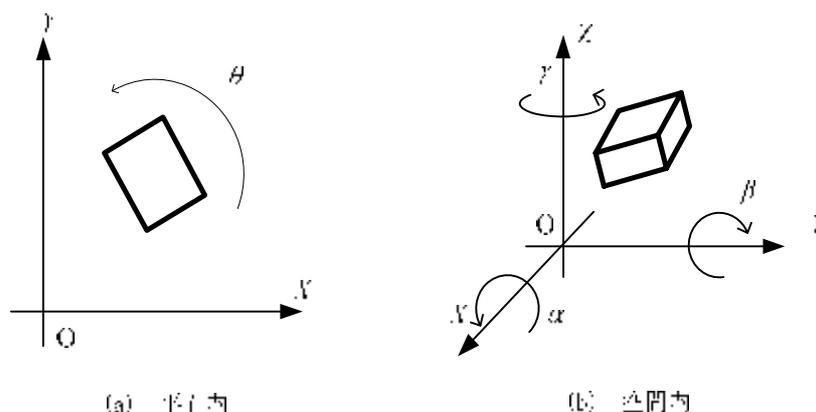


図 1.11 剛体の自由度

自由度は，一般に，ある物体の運動を表すために必要な，独立した変数の数を表す．最も基本的な例として，図 1.11 (a)に示すように平面に置かれた剛体の自由度を考えてみよう．平面内に 2 軸直交座標を設置すれば，剛体の位置が X および Y の 2 変数で表される．対象とする物体が質点であれば，その運動はこれら 2 変数で表されることになるので 2 自由度である．しかし，対象物が剛体の場合，我々は剛体の位置を X および Y 軸方向に沿って変化させられるとともに，図 1.11 (a)のように剛体を平面内で回転させ，いわゆる姿勢を変化させることができる．すなわち，平面内における剛体の運動は， X ， Y および剛体の回転角 θ の 3 変数で表されるので自由度は 3 である．同じく，空間内における剛体の自由度を考えてみよう．図 1.11(b)のように 3 次元直交座標系を設定すれば，剛体の位置は， X ， Y および Z の 3 変数で表される．さらに，剛体は， X ， Y および Z の各軸周りに回転させることができる．したがって，空間内に置いて剛体の運動を示す変数は図 1.11(b)の記号用いれば，位置を示す X ， Y および Z と，姿勢を示す α ， β および γ の 6 つとなり，

その自由度は 6 である。

質点の運動では 2 次元平面内における自由度が 2, 3 次元空間内における自由度は 3 であるが, 剛体の場合はそれぞれ 3, 6 となることに注意しよう。

さて, 以上のような剛体に何らかの拘束を加え, ある定まった運動を行うように仕組んだものがジョイントや機構であり, その自由度は上述の剛体と同じく, 運動を表す独立した変数の数で表される。ロボットを構成する重要な機械の要素であるジョイントの自由度を考えてみよう。図 1.2 に示す回転ジョイントおよび直進ジョイントは, それぞれ 1 軸周りの回転角および 1 軸方向の並進変位によって運動が表される。したがって, 自由度はいずれも 1 である。これに対し, 図 1.4 に示すボールジョイントは, その運動が直交する 3 軸周りの回転角で表されるから 3 である。

1.7 ロボットの自由度

ロボットの自由度を考えてみよう。ロボットの運動は, 複数のジョイントがそれぞれ回転, 直進することにより創成される。しかし, ロボットの作業や制御を検討する時に対象となるのは出力点または出力リンク, すなわち出力部の運動である。したがって, ロボットの自由度は出力部の運動を表す独立した変数の数で表される。その出力部は, ロボットに用いられる能動ジョイントで運動させられるので, 通常は, 用いる能動ジョイント, 言い換えれば, アクチュエータの数と自由度は一致する。

例として, 図 1.5 に示すロボットはいずれも 3 自由度である。また, 図 1.10 に示した平行ロボットは, 図中の直進ジョイントを能動ジョイントとすることで, 出力節を直交する 3 軸方向へ移動可能であるとともに, 各軸周りに回転させることができ, 6 自由度となる。

ロボットを設計・選択する場合は, 作業に適した自由度のロボットを検討しなければならない。そこで, ロボットの自由度と作業との関係を

考えてみよう．上述のようにロボットの自由度は，ロボットの出力点または出力節の運動を表す変数の数である．ここで，出力点および出力リンクは，それぞれ単一の質点および剛体として考えることができる．1.6で述べたように質点および剛体の自由度は，平面内では2および3，空間では3および6である．したがって，平面内で運動を行うロボットは2自由度であれば，出力点の位置が制御でき，また，図1.12に示すように3つの回転ジョイントにそれぞれアクチュエータを配置した3自由度のロボットであれば，出力リンクの位置だけでなく，その姿勢，すなわち出力リンクの傾きまで制御可能となる．同様に，空間内で運動可能なロボットでは3自由度であれば出力点の位置決めが，また，6自由度であれば図1.10の平行ロボットのように出力リンクの位置・姿勢決めが可能となる．

ロボットの自由度を検討する場合，ロボットの運動が平面内で行われるのか，または空間で行われるかを区別することは重要である．図1.12および図1.5に示したロボットは，いずれも自由度が3であるが，図1.12のロボットが平面内の作業領域において出力リンクの3自由度の位置・姿勢決めが可能であることに対し，図1.5のロボットは可能ではない．これは図1.5のロボットがいずれも空間内で運動を行うロボットで，空間内での自由度が3であり平面内での位置・姿勢決めに必要な3自由度を有していないためである．以上のように自由度が十分であるかどうかは，ロボットの運動が平面内で行われるのか，また，空間で行われるのかで異なる．一般に機構は，平面内でのみ運動する機構を平面機構，また，空間で運動する機構を空間機構と呼び区別する．ロボットの自由度を検討する場合にも，用いる機構が平面機構であるか，また，空間機構であるかを検討する必要がある．[コラム：球面機構]

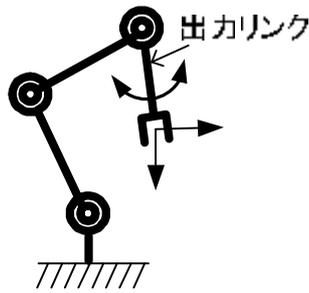


図 1. 12 3 自由度平面ロボット

ロボットによっては 3 より大きい平面内の自由度を有するロボット、また、6 より大きい空間内での自由度を有するロボットが存在する。このように、出力点または出力リンクが単体として平面または空間で有する自由度より大きなロボットの自由度を冗長自由度と呼ぶ。冗長な自由度を持つロボットは、図 1. 13 のように様々な姿勢をとることが可能となるため障害物の回避等が容易になる。しかし、同時にある位置・姿勢決めを実現するための、各ジョイントの変位の解が多数となるので制御は複雑になる。

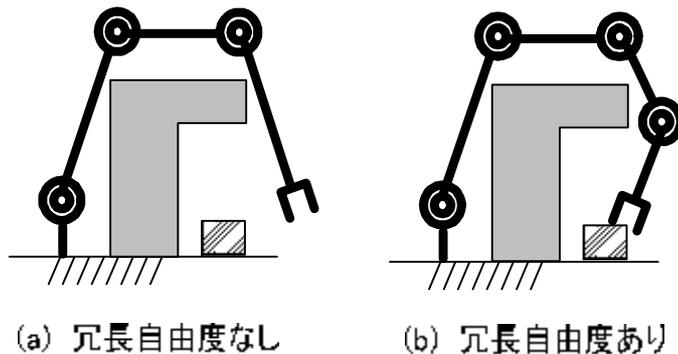


図 1. 13 ロボットの冗長自由度

また、空間で運動するロボットにおいて自由度が 6 未満、また、平面内で運動するロボットで自由度が 3 未満である場合、位置・姿勢決め時には制御できない変位が生じることを注意しなければならない。例えば、空間において 3 自由度の運動が可能なロボットは、出力リンクの位置・

姿勢を表す変数の中の 3 つを制御可能である。ただし，出力リンクの空間での位置姿勢を表すために必要な他の 3 つの変数は，制御の対象となる 3 つの変数に対して従属的に変位する。すなわち，パラレルロボットとして図 1. 14 に示すような空間 3 自由度パラレルロボットがよく用いられるが⁽¹⁾，同ロボットの制御時には，出力リンク単体の位置・姿勢を表す変数において，制御の対象としていない変数に従属的な変位が発生する。実際にロボットを制御する際には，これら従属的に生じる変位に注意しなければならない。

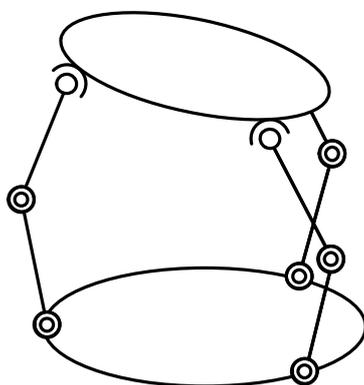


図 1. 14 3 自由度空間パラレルロボット⁽¹⁾

1.8 ロボットの自由度の求め方

ロボットの自由度は，ロボットを構成する複数のリンクおよびこれらを連結するジョイントで決定される。さらに，各ジョイントはその種類により，特定の自由度を持つ。これらリンク，ジョイントの組合せから，ロボットの自由度を決定する方法について学習する。

図 1. 12 に示すような開ループロボットなど，シリアル形式のロボットでは，出力部を制御するために，すべてのジョイントを能動ジョイントとしなければならない，ロボットの自由度はジョイント数に等しい。し

かし、図 1. 1, 図 1. 6(b)に示した平行クランクロボット, 図 1. 10 に示したパラレルロボットなど, 閉ループ, 復ループロボットでは, 能動ジョイントとするのは一部のジョイントである. したがって, ロボットの機構形式に対する自由度を求め, その自由度に等しい数のアクチュエータを, いずれかのジョイントに配置しなければならない. また, 実際のロボットの設計時には, 作業に必要な自由度を決定し, 同自由度を満足するリンク, ジョイントの組合せ, すなわちロボットの形式を決定し, 自由度に等しい能動ジョイントの配置の検討が行われる.

図 1. 10 に示したパラレルロボット等の検討を想定すればわかるように, 直感的にある自由度を満足するロボットの形式を決定することは容易でない. しかし, 以下に述べるわかりやすい考察から導かれるグリューブラー (Grübler) の式が, ロボットの自由度と, リンク, ジョイントの組合せを表してくれる.

グリューブラーの式は以下の通りである.

$$G = M(N-1) - \sum_{m=1}^{M-1} (M-m)j_m \quad (1.1)$$

ここで, G はロボットの自由度, N はロボットを構成するリンクの総数である. M は剛体としてのリンク単独の自由度であり, 先に述べたとおり運動が平面内のみで行われる場合は 3, 空間内である場合は 6 となる. m は各ジョイントの自由度であり, j_m は自由度が m であるジョイントの総数である.

グリューブラーの式は以下のように導かれる. まず, ロボットを構成するリンクの数が N であり, これらが連結されていない場合, 一つのリンクの自由度は M であることから, ロボットに用いるリンクの自由度の総数は $M \times N$ となる. ただし, 実際には, いずれかのリンクはベースとして固定されるので, 自由度の総数は $M \times (N-1)$ となる. この値が式(1.1)の第 1 項となる. さらに, これらのリンクは m 自由度のジョイン

トで連結される。 m 自由度のジョイントで連結されたリンクは結果的に $(M-m)$ の自由度を拘束される。したがって、 m 自由度のジョイントが j_m 個である場合、 $(M-m) \times j_m$ の自由度が拘束される。これらの総和である式(1.1)の第2項である。したがって、リンクの運動が拘束されていない自由度である第1項から、ジョイントによる連結で拘束される自由度である第2項を除いた式(1.1)がロボットの自由度を表すことになる。したがって、ある自由度を有するロボットを設計する際には、所要の自由度 G を満たす、リンクの総数 N 、 m 自由度のジョイントの個数 j_m の組み合わせを検討すればよい。

このように Grübler の式は、ロボットや機構の自由度を求めるために有用である。ただし、Grübler の式は条件によってはあてはまらない場合もあるため、使用には注意が必要である。例として図 1. 15(a) の形式のロボットを考えてみよう。図 1. 15 (a) のロボットは、リンクの総数 $N=4$ であり、自由度 $m=1$ の回転対偶を $j_m=5$ 個用い、運動は平面内で行われることから、その自由度は、式(1.1)において $M=3$ とし

$$3(5-1) - \sum_{m=1}^{3-1} (3-m)j_m = 12 - (3-1) \cdot 5 = 2$$

となる。仮に、閉ループ部分に図 1. 15(b) のようにリンクを加え、回転ジョイントで連結してみよう。自由度は節が 1 増え、回転ジョイントが 2 増えることから

$$G = 3(6-1) - (3-1) \cdot 7 = 1$$

となり、自由度が減少する。具体的には閉ループ部分がトラス構造となり、運動できなくなる。しかし、追加したリンクが図 1. 15(c) に示すように両端のリンクと平行であれば、容易に想像可能なように、閉ループ部分も運動可能となる。このように幾何学的条件によっては式(1.1)で示したグリュブラーの式の式で自由度を表すことはできない。

補足として、図 1. 15 で図示している棒状のリンクの数は 4 であるが、実際には設置している部分、すなわち、ベースもリンクと考えなければ

ならないので、リンクの総数は 5 となる。これまで示したロボットの図に置いて、ベース部分を含めた数がリンクの総数となることに注意しよう。

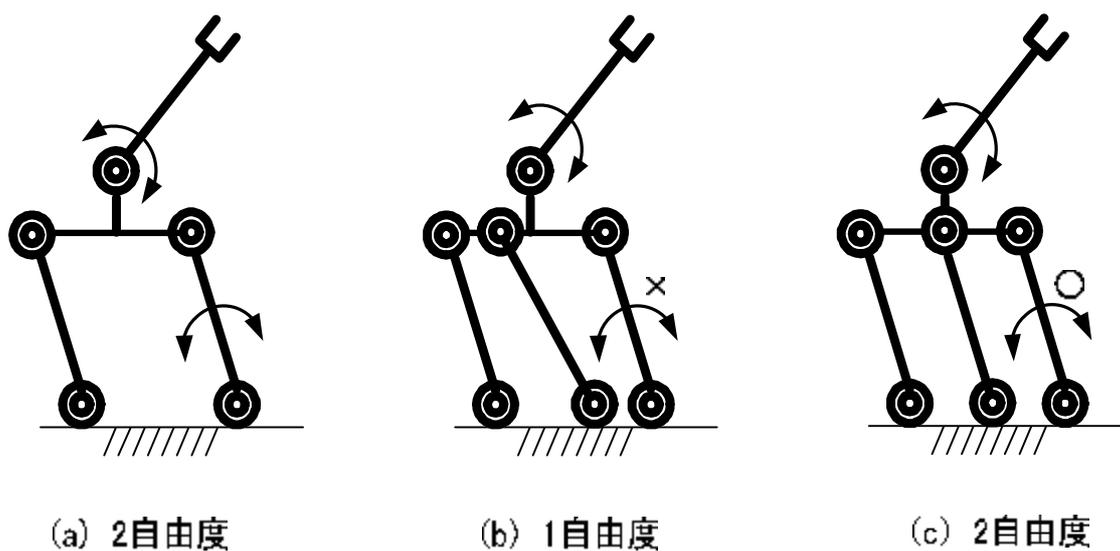


図 1.15 ロボットの形式と自由度の関係

(例題：図のロボットの自由度を求めよ。)

例題：平面内で 3 自由度を持つ平行ロボットのジョイント構成を求めよ。