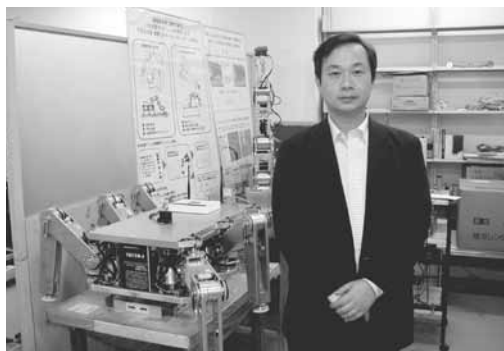




新たな制御による多様な可能性

山浦・黄 研究室～機械制御システム専攻



黄 慶九 助教

今日、生産されているロボットの種類は多岐に渡る。中には、テレビにより紹介されるものもあるなど、身近になっている。一方で、産業の進化に伴い、複雑な機構を持つロボットが増え、制御に要求される技術や精度は日々高度化している。

ロボットの高精度な制御を可能とすることによって、社会のさまざまなニーズに応じていくことが、山浦・黄研究室の目標である。今回は、その中でも黄先生の研究である、安定した二足歩行や作業能力の拡張などを目標とした、制御方法についての話を伺った。



自律型ロボットの制御

現在、ロボットは能率の向上や危険の回避などの目的のために、さまざまな場面において人間の代わりに活躍している。特に最近では、技術の発達に伴い、従来のロボットに比べ自律型ロボットに注目が集まっている。ここでいう従来のロボットとは人間が操作するか、決められたプログラムにのみ従って動くロボットのことである。それに対し、自律型ロボットとは自身で状況を認識して次に行う動作を決定するロボットである。自律型ロボットの細かい制御はロボット自身で行うため、ロボットを動かすときに必要とされる人間の操作は少ない。しかし、その分ロボットが担う仕事が多くなるため、制御も複雑なものとなっている。具体的に自律型ロボットの制御がどのように行われているのかについて見てみよう。

自律型ロボットは、あらかじめ組み込まれているプログラムに、搭載されたセンサから得た情報を数値化して代入することで、次に行う動作を決定する。具体的には、位置や姿勢、加速度などのロボットの情報と、温度や光度、接触力などの周囲の情報の二種類がある。このプログラムは、各動作部の動きを運動方程式などの数式をもとに解

析し、その結果から作られたものである。

このプログラムを作る際には、何を優先するか重要となる。例えば、精度を優先したプログラムを作るのならば、そのプログラムは細かい部分まで考慮する必要があるため、複雑になってしまう。これでは解を出すのに時間がかかってしまうため、動作の決定が遅くなる。逆に、動作を決定する早さを優先すると、プログラムを簡略化する必要がある。だが、これでは目的とする動作と実際の動作に誤差が生じてしまう。このような関係があるため、精度と動作決定の早さを両立させることが難しいのだ。

機械制御システム専攻の黄先生は、このような問題を、より良い制御方法を探すことによって解決しようとしている。先生の行っている主な研究は、二足歩行ロボットや6自由度マニピュレータである。二足歩行ロボットでは、環境適応性とエネルギー効率の向上を、6自由度マニピュレータでは、精度を維持しつつ動作の決定速度も上げられるような制御の実現を目指している。以下では、これらの研究においてどのような制御方法を行っているのかを紹介しよう。



二足歩行とエネルギー効率

私たちは歩いているとき、必要以上に脚に力を込めることはない。実際、人間は無意識のうちに、エネルギー効率の高い二足歩行をしていることが近年の研究で明らかになっている。高効率であることの理由として、前に移動するときには主に蹴り出しの勢い（慣性力）。足を下ろすときには重力を有効に利用していることが挙げられる。黄先生は効率的な二足歩行ロボットの歩行方式を開発するにあたり、こうした人間の歩行メカニズムを導入しようと考えた。

一般に、二足歩行ロボットの歩行方式は大きく能動歩行と受動歩行の二つに分類できる。能動歩行とは、常にアクチュエータを稼働させて動く方式であり、高い環境適応性を備えている。ここでいうアクチュエータとは、エネルギーを使って動作する駆動源のことをいう。しかし、この方式は常にアクチュエータを動作させる必要があるため、多くのエネルギーを使ってしまうのだ。一方の受動歩行は、自ら動力源を持たないが、初速による慣性力と高低差による位置エネルギーのみで動く方式であり、高いエネルギー効率を持つ。だが、その方式故に受動歩行は位置エネルギーを得られる坂道でしか行うことができないのだ。

黄先生は始めに受動歩行の効率性に着目し、それを平地でも得られる方式の一つとして自励駆動を用いた歩行について研究を行った。自励駆動とは、腰部にのみアクチュエータをつけ、地面を蹴る動作のときにこれを稼働させ、その初速による慣性力と重力を利用して歩行する方式である。この蹴り出しによって、坂道でなければ得られない

位置エネルギーを補っている。こうして、受動歩行に近いエネルギー効率を得ながらも、坂道以外で歩行できるロボットを実現したのである。

しかし、こうしてできたロボットは高いエネルギー効率を得ることができたが、環境適応性が悪かった。この問題を解決するために、黄先生は能動歩行についても研究を行った。前述したように、この方式での動作は人間の歩き方に比べて、余計なエネルギーを消費しているといえる。そこで、黄先生は最適軌道法という、非効率的な動作を改善可能な制御方法を開発した。これは、運動方程式をもとに消費エネルギーを求め関数を導出し、その関数を解くことによって、消費エネルギーが最小値になるような軌道を求めるという方法である。消費エネルギーを減らすということは、アクチュエータの使用を控えることにつながる。これは一見、積極的な姿勢制御が困難になることを意味すると思われる。だが、研究を進める中で、アクチュエータの使用を控えていくことによって、姿勢制御の向上をも実現できているということがわかってきたのだ。つまり、最適軌道法の研究を進めていけば、将来的には姿勢制御についても完成度の高い歩行方法を得ることができるのである。また、この最適軌道法はさまざまな構造のロボットにも適用が可能だ。

それでは、最適軌道法の具体的な説明をしよう。ロボットの歩く動作は両脚について対称的であるので、片脚が地面から離れて着地するまでを左右交互に繰り返すものと考えることができる。そこで、一歩の動きを一周期と考え、その間の消費エ

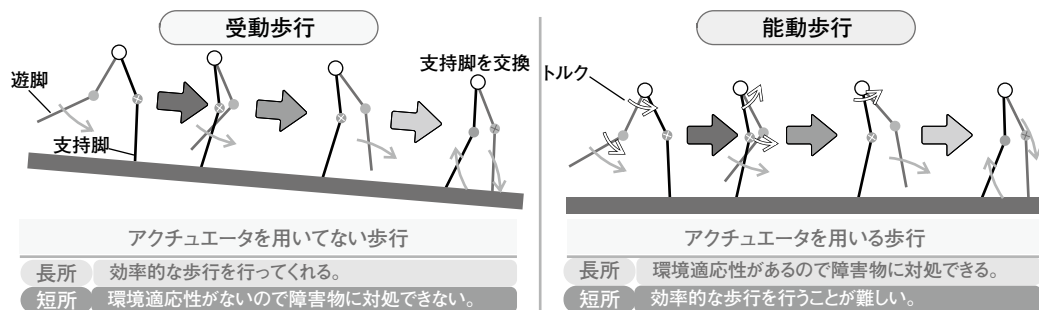


図1 能動歩行と受動歩行

エネルギーの関数を、関節の構造的な制約を考慮した上で、関節角の時間変化を変数として求める。これを解析することにより、最適な軌道を求めたのだ。その結果、アクチュエータを用いる能動歩行でも、受動歩行に近い効率的な歩行を実現することができた。

こうして、受動型と能動型、両方の歩行方式を研究した先生は受動型のエネルギー効率と能動型の環境適応性、それぞれの良い部分を取り入れた受動能動融合型ロボットを開発しようと考えた。このロボットは能動型として動く途中にある、力を加える必要のない動作に受動型の制御を適用することで、アクチュエータによる消費エネルギーを減らそうとしているのだ。

しかし、能動型のロボットには人間でいう膝の部分に受動型には用いていないアクチュエータが存在する。このアクチュエータは動作していないときでも関節の内部構造と接触し続けており、これによる摩擦で関節が動きにくくなる。摩擦が大き過ぎる関節では、受動歩行ができないので、能動歩行から切り替えたときに、歩行が続かないという状態が起こりうる。このため、関節内部の動きを切り替えることが必要となるのだ。

これまで、受動能動融合型ロボットではバネや

クラッチを用いてアクチュエータを物理的に切り離していた。しかし、その機構は複雑なものであり、実際には受動歩行と能動歩行をスムーズに切り替えることができなかった。切り替えに遅れが生じると、前述のようにアクチュエータの摩擦による予想していなかった影響を受けてしまう。このため、より素早く確実な切り替えが求められているのだ。

機械的に関節内部の切り替えを行うと遅れが生じてしまうので、黄先生は融合型の切り替えを電氣的、つまりプログラム上で行う方法を考案した。それがゼロトルクフィードバック制御である。電氣的制御を行うことで、機械的な制御の場合よりも切り替えにかかる時間を飛躍的に短縮できるのだ。ゼロトルクフィードバック制御はアクチュエータの摩擦を測定できるセンサを用い、その摩擦を打ち消すような力をアクチュエータからかける方法である。この制御を受動歩行状態の時に行うことで、機械的な方式では実現できなかった、素早い切り替えが可能となり、アクチュエータ内部の摩擦による問題が解決した。

このような研究を行っていく上で、黄先生はより効率の良い二足歩行ロボットの歩行方式を目指している。



面を捉えるマニピュレータ

マニピュレータとは人間の腕と同等の機能を持ち、関節とそれを動かすアクチュエータからなる産業用ロボットの種類である。その構造の多くは図2のようになっており、使用時には、溶接はならバーナー、組み立てならドライバーといったように、対応した工具をマニピュレータの手先に取り付けることで、さまざまな作業が可能となる。そして腕の長さを考慮した上で関節の角度を制御することにより、工具の先端を任意に配置させることが可能なのだ。

腕の長さよりも短い半径内でのマニピュレータの可動能力は関節数に左右される。よって3次元空間内において全空間を動くためには、ある程度の関節数が求められており、一般的なマニピュレータは6個の関節を備えている。このようなタイプのロボットは6自由度マニピュレータと呼ばれている。ただし、関節が増えれば自由度とともに

に制御すべき対象も増すため、コンピュータによる複雑な計算が不可欠となる。このような背景があるため、黄先生は6自由度マニピュレータの効率的な制御方法について研究を行ってきたのだ。

マニピュレータを制御する際、制御対象となるのは各関節の「角度」である。工具の先端の空間

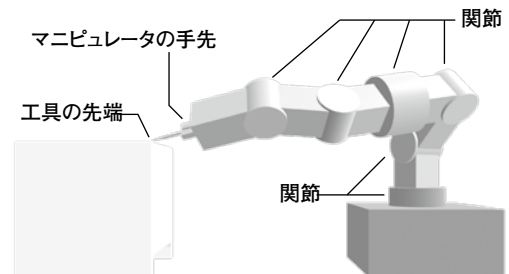


図2 マニピュレータの外観

座標を示す「位置」、工具の向いている方向を表す「姿勢」、それぞれ二つの要素を目的の数値に近付けるような関節の「角度」を求めている。このように、目的とする位置と姿勢からそのときの各関節の角度を求める解析法を逆運動学法と呼ぶ。従来は、中でもニュートン・ラプソン法と効率的解法という二種類の解析法で適切な角度を求めていたのだ。

ニュートン・ラプソン法とは、関節の角度を行列で表現し、物理数学の問題としてこの解を求めようというものだ。もし解けるのならば、機械制御において最も正確で汎用性のある手法の一つである。しかし、自由度の少ないマニピュレータならば問題はないのだが、自由度が多いマニピュレータでは計算が複雑になり、膨大な時間がかかってしまうため、この方法は実用的ではない。例えば6自由度マニピュレータに用いる場合には、位置と姿勢の要素からなる6×6の行列の逆行列を計算する必要があり、実際にこの方法で制御することは困難である。

一方、効率的解法とは行列を近似する解法である。前述の6自由度マニピュレータの制御の場合、各関節の角度の値を位置と姿勢の値に変換する式は6×6の行列で表現されていたが、効率的解法ではそれを3×3の行列2つに近似する(図3)。6つの角度のうち3つを位置の制御、残り3つを姿勢の制御に割り振り、3×3の行列でそれぞれ変換しているのだ。これにより解を求めるための逆行列の計算が簡単になる。得られた解を位置と姿勢に代入することで目標値に一致させるのだが、実際には位置と姿勢は独立した要素ではないため、一方を変化させると他方がそれに連動して変化してしまう。このような理由から、同じ手順を繰り返し行うことでマニピュレータの位置と姿勢を目標値に可能な限り収束させているのだ。だが、この解法では時間を短縮できるものの、誤差が大きくなる傾向があり、マニピュレータの位置

と姿勢が収束する適切な解が求められる確率が低くなる。

そこで、黄先生は逐次検索法という制御方法を考案した。これは効率的解法を発展させたもので、位置と姿勢に関する行列を近似するまでは効率的解法と同じである。しかし、効率的解法のようにマニピュレータを一度で目標値まで動かしてから誤差を修正するのではなく、その過程で「重み」という概念を取り入れ、解の精度を高めるのが最大の違いだ。重みとは、その解に対する信頼性のことであり、一般的には1以下の正数で表現される。現在値と目標値までの差に重みを掛けた値を用い、位置か姿勢をその値まで合わせ、次にもう一方も重みを掛けた値まで合わせる。これを繰り返していくと漸近的に誤差を小さくすることができるのだ。これは効率的解法より少し時間が掛かるが、比較的高確率で解が求まる。実験では位置および姿勢に一律で0.6の重みを与えることで、精度を向上させることに成功した。しかし、常に一定の重みを使用すると、数値によっては解が収束しない場合もある。そのため、計算の度にランダムに重みを変えることによって、より収束する可能性を上げるという手法がとられたが、これも必ずしも適切な重みを持たせているとはいえない。そのため、将来的には目標値に対して常に適切な重みを持たせることのできる関数を見つけることが必要となるのだ。その他にも、目的としているものが実現可能な位置及び姿勢かどうかを事前に予測させることなどを目標として、先生は研究を進めている。

また、黄先生は面接触作業用のマニピュレータも研究している。これまでの産業用マニピュレータでは、切削、組み立て、溶接などの作業を、工具を一つの点とみなせる点接触作業としてしか行うことができなかった。工具を面とみなす面接触作業が困難である理由は、主に二つある。一つは対象との接触角度だ。点接触作業の際は、先端位置が正確に制御できれば、姿勢は多少誤差があってもよかったのだが、面接触作業の場合は対象との接触角を一定にしなければならないので、姿勢も正確に制御する必要がある。もう一つは対象物との接触時にかかる圧力である。面接触作業では、均等に加工を行うために工具の面上の接触圧力が偏らないようにする必要がある。これらの問題を

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{bmatrix}$

3×3の行列2つに近似したため、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ による位置、 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 による姿勢の成分が誤差になる。計算自体はとても簡略化される。

図3 効率的解法による近似

解決するためには工具の面にかかるモーメントの制御が必要となるのだが、現状の制御方法ではその制御は困難なのだ。

現在、対象物に接触し力を加えるタイプのマニピュレータの力制御には、主に二種類の方法が使われている。一つはインピーダンス制御と呼ばれているものだ。インピーダンスとは機械部品の外力に対する変位しにくさを表す数値である。つまり、目的の接触圧力にするのに必要となる、各関節に与えるトルクを求めているのだ。しかし、6自由度マニピュレータに対してインピーダンス制御を行う際には、位置と力という異なる要素同士を用いて制御することになるため、高精度な制御をすることは難しい。

もう一つは位置・力のハイブリッド制御と呼ばれるものだ。この方法では、作業面に垂直な方向にかかる力を力ベクトル、平行な方向への移動を位置ベクトルでそれぞれ表現し、この二つの要素に対して同時に制御を行っている。インピーダンス制御と違い、この二つの要素を別々に制御できるので、それぞれの精度をより向上させることができるのだ。よってこの制御方法は、工具の先端位置と、そこにかかる力を制御するだけでいい点接触作業には適している。しかし、前述のように面接触作業では工具の面にかかるモーメントも考慮に入れる必要があり、この解法をそのまま適用することはできないのだ。

このように、現状では面接触作業をマニピュレータで行うことは難しい。しかし、もし面の要素をもつ工具を取り入れることができれば、塗布、研磨など新しいジャンルのマニピュレータが開発可能となるのだ。

そこで、黄先生は面接触作業用マニピュレータの制御方法として、位置・力・姿勢・モーメントのハイブリッド制御を提案した。これは前述した制御を発展させたものであり、位置ベクトルを位置と姿勢の情報、力ベクトルを力とモーメントの情報に分解したのである。この新たなハイブリッド制御を可能にするために不可欠であったのが、

先生は他にも多くの研究を行っていらっしゃいますが、紙面の都合上、研究のすべてを紹介することはできませんでしたが、深くお詫び申し上げます。

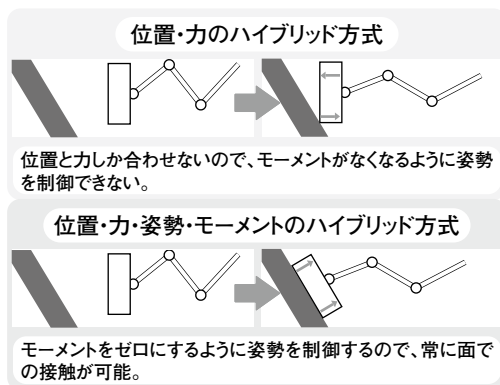


図4 マニピュレータのハイブリッド制御姿勢成分分離法だ。なぜなら、今までの制御方法で面接触ができなかった理由が、姿勢とモーメントの制御系を独立化できていないことにあったからである。

工具を対象の面に近づけるのは姿勢制御だが、それだけでは誤差が残ってしまう。この誤差を消すためにモーメント制御が必要なのだが、今までは独立化ができていなかったため、姿勢制御も一緒に行ってしまう、誤差を消すことができなかったのだ(図4上)。

黄先生は、この姿勢成分分離法を開発することによって、二つの制御系の分離に成功し、正確な面接触を可能としたのである(図4下)。

こうして、レーザーを取り付けた6自由度マニピュレータでももとの目標値から動いて斜めになってしまったホワイトボードの文字を消すことに成功した。これは、レーザーにかかるモーメントを制御できない力・位置のハイブリッド制御にはできなかったことだ。また、同じ6自由度マニピュレータの先端を人間が手で押すと、力やモーメントが釣り合うようにその手を押し返させる、といった制御にも成功している。

このように、黄先生は研究の際、社会のニーズを重要視している。二足歩行、マニピュレータ、そして現在研究中の自動車のコーナリングに関する制御技術など、これから社会が必要としている分野の研究はさらに進んでいくことだろう。

最後に、お忙しいにも関わらず、度重なる取材にも快く応じてくださった黄先生に厚くお礼申し上げます。

(秦 翔)