



新たに拓く機械の地平

杉本・武田 研究室～機械物理工学専攻



武田 行生 助教授

杉本 浩一 教授



シンセシスとは

人類が動力源として水車を使い始めたのは紀元前からであり、ワットの蒸気機関が誕生したのが1788年のことだ。人類の歴史は常に機械の発達の歴史と共にあったのである。古くは粉碾き臼から始まり、やがて産業革命期の紡績織機等を経て、機械は私たちの生活の中に溶け込み、今では社会に必要不可欠な存在となっている。この過程の中で機械の開発の軸は一自由度から多自由度へと移り変わってきた。自由度というのは動力の数と考えてもらうとわかりやすいだろう。昔の紡績工場などでは動力は大きくそして貴重なものであったので、たった一つの動力で工場の全ての機械を動かしていた。そのため機械の設計を工夫することのみで要求される運動を実現せねばならなかったのである。しかし現代では小型軽量のモーターが開発されたことにより、機械を比較的自由に設計できるようになった。これによって機械はより複雑な運動をすることが可能になり、その活動領域は広がっていったのだ。

我々の生活は機械の発達によって以前と比べてずいぶん便利になった。しかし機械は万能ではなく出来ないこともまだまだ多い。それでも社会は

「シンセシス（総合）」それが杉本・武田研究室のテーマである。あまり耳慣れない言葉だが、わかりやすくいうと「新たな機械システムの創造」である。杉本・武田研究室では今までとは一味違う発想に基づいた、新しい機械の要となるべき機械システムが開発されている。

この記事では、単なる創造にとどまらないシンセシス（総合）というテーマについて理解を深めてもらうとともに、そこから生まれた新しい機械システムを利用した、個性豊かな機械たちを紹介してゆこうと思う。

日々進歩し、機械への要求はより厳しいものへと変わってきている。そこで、その要求に答えていくためには今までの機械とは異なった機械が必要であるとの考えのもと、杉本・武田研究室では今まで研究され続けてきた機械の改良ではなく、全く新しい発想に基づいた、これからの機械の核となるべき機械システムの開発を目指して研究活動を進めている。

ここで注意してもらいたいのは、杉本・武田研究室で開発されているのは機械ではなく機械システムであるということだ。もちろんその成果は応用され洗練された機械製品となって社会に還元される。しかし研究の本来の目的はその機械の要となる機構の体系化によって、新しい機構の応用へと道を拓くことにある。

しかしながら、一つの新しい機械システムを生み出すということはそう簡単な話ではない。仮に良いアイデアがあったとしてもそれ自体では使うことができないのだ。なぜならば、工学における技術とは生活の中で利用されるものだ。事故や故障が起きてはならないし、要求される性能も非常に高い。技術を実生活に応用するには発想だけで

は足りない。成熟した機械システムとして完成させるためには、次のように数多くの段階を経る必要がある。

まず大前提として、これから創ろうとする機械システムに対してさせたい仕事、要求が存在する。すると機械にどのような動きをさせる必要があるかが決まり、その動きを解析する必要が出てくる。解析によって機械をどのような構造にすればよいかを考え設計し、設計図を描き製作する。そして試作機が製作されれば制御法を確立し、性能を評価して確かめ、修正すべき箇所をフィードバックする。これらの繰り返しによってようやく

一つの機械が完成するのだ。これら全てを一貫して行い、一つの機械システムを完成させることを「シンセシス（総合）」といい、これこそが杉本・武田研究室のテーマである。

実際に杉本・武田研究室では、新たな発想に基づいた機械システムに対して解析、評価手法を確立させ、機構の最適化、制御法の開発を行っている。さらに自ら旋盤、フライス盤、ボール盤などの工作機械を用いての製作も手掛けるなど、実に多岐にわたる研究を進めながらシンセシス（総合）というテーマに取り組み、新たな機械システムを創りあげているのだ。



ブレークスルーの鍵、パラレル機構

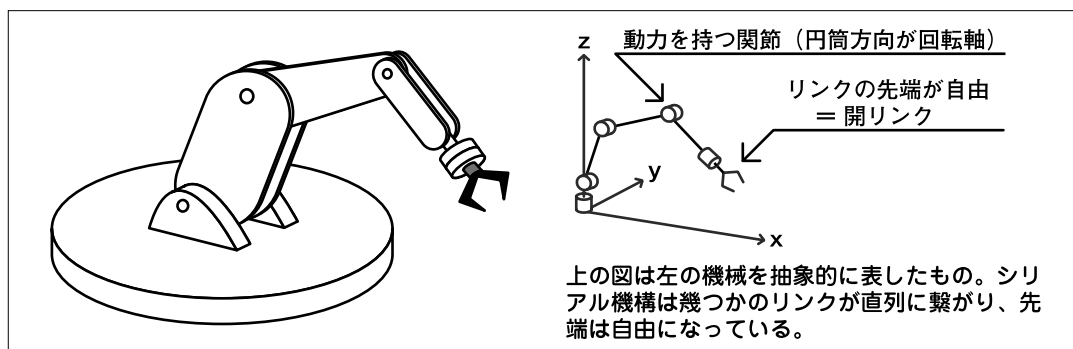
21世紀はロボットの時代と言われている。機械は多自由度化が進み、より複雑な動きが可能なロボットが生まれてきた。ロボットと聞くと皆さんは何を想像するだろうか。鉄腕アトムのような人型ロボット、AIBOのようなペットロボット、はたまた産業用のアームロボットかもしれない。外見も作られた目的もばらばらのこれらのロボットだが、実はその構造の基本はどれも同じだ。皆その可動部の構造は開リンクの接合部に動力がついた形をしている。こうした構造をシリアル機構という。シリアル機構は構造がシンプルで動きを自由にとりやすいという利点があり、長年研究され、色々な場所に応用されてきた。

しかしそんなシリアル機構にも苦手なことがある。シリアル機構は縦に縦にと繋げられるその構造上の特徴から、根元のモーターは先の構造の重量を支えねばならず、重い物を扱うのは困難だ。

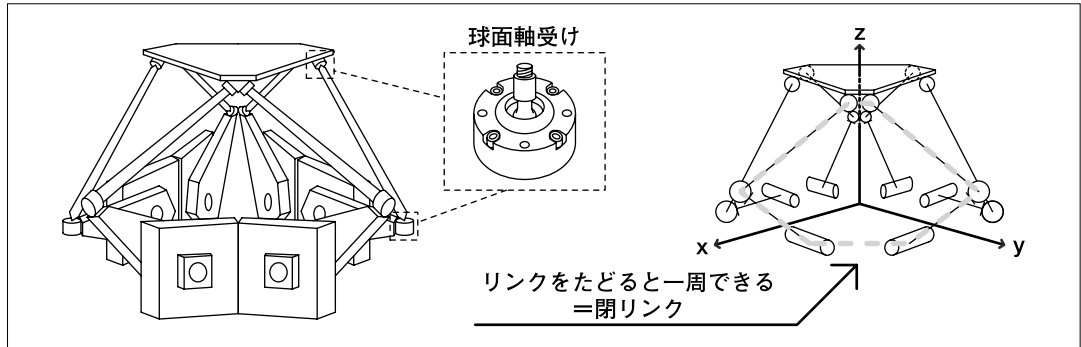
また、アームが長くなると誤差が拡大されてしまう上に、慣性モーメントも大きくなり、高速の運動には向かない。そこでこれらの短所を克服するために1980年代後半以降あちこちでパラレル機構という構造が研究され始めるようになった。

パラレル機構は一つの台に回転ジョイントと閉リンクを組み合わせたもので、複数の剛体で台を保持するため剛性が高い。そのため高負荷、高精度、高速の運動に適している。杉本・武田研究室ではこのうちの精度に着目して研究を進め、これまでにある程度の答を得た。

工作機械のワークテーブルを想定して作られた杉本・武田研究室の六軸六自由度パラレル機構は300mmのストロークに対する15 μm の絶対位置決め精度を誇る。この数字を見ただけでもその能力の高さが伝わってくるが、実際すばらしい性能だ。今までのシリアル機構では動作させたときに



シリアル機構の例とモデル図



パラレル機構の例とモデル図

その機構の特性上、どうしても数mmの誤差が出てきてしまっていた。それが、このワークテーブルでは誤差がアルミホイルの厚さ分あるかないかというレベルなのだ。これはあの巨体（一面の写真、先生方の大きさと比較してもらいたい）からすれば驚くべき数字である。しかもリンクが複雑なパラレル機構で稼働範囲の限定された球面軸受けを使いながら、x,y,z軸それぞれ約700×700×360mmという大作業領域と各軸周りの最大角変位70度65度95度という姿勢の自由さも同時に実現させている。パラレル機構の採用によって従来のシリアル機構では不可能であった高性能を達成させたのである。

しかしパラレル機構がいかに優れた特性を持つといえども、これほどの高性能を発揮することができるようになったのは、ひとえに杉本・武田研究室におけるシンセシス（総合）による多方面からの研究の賜物なのだ。

精度を出す。即ち思い通りの場所に正しく機械を動かすためには、機械の形状を完全に把握すること、そしてそれを正確に動かすことの二つが重要である。前者はさらに剛性を高め運動・負荷時もその形を維持することと、寸法を正確に決定することに分かれている。杉本・武田研究室ではこれらの課題に対して次のように研究開発を進めていった。剛性を高めるために負荷に対して強い構

造を設計し、丈夫な素材を選び、弱点となりやすい関節の球面軸受けを改良し、トルクの強いモーターと減速機を選定した。製作面では精度を出すために寸法どおり機械を組み立てる必要があるがどうしても誤差は出てきてしまう。そこでパラレル機構のキャリブレーション手法（*注1）を開発して実行し、誤差を含めた寸法を決定した。そしてより正確な運動を実現させるために、キャリブレーションによって得られたデータを含めて逆運動的（*注2）に機構モデルを演算し、短いサンプリングタイムでサーボモーター（*注3）に指令を発する制御法を確立させたのだ。

そのうえこのワークテーブルではパラレル機構の、リンク同士が干渉しやすく動きが取りにくいという弱点を解消すべく構造解析を加え、精度だけではなく前述のような高い位置・姿勢の自由さを得るに到ったのだ。また他にも杉本・武田研究室では100mmのストロークに対する20nmの位置決め分解能を誇る六自由度パラレル機構も開発されている。

以上のことは全て一つの機械システムを完成させるシンセシス（総合）の一環である。このような杉本・武田研究室におけるシンセシス（総合）によってパラレル機構という新たな機械システムの実成が進み、パラレル機構の完成形の一つの姿が見え始めてきたのだ。

*注1 機械に含まれる誤差を測定し、その存在と影響を調べあげること。この誤差を考慮して制御用モデルが組まれる。パラレル機構は構造が複雑なため動作させたときの誤差の現れ方も様々である。そのため効率のよいキャリブレーションには十分な解析が不可欠となる。

*注2 機械の動きを考える際に、機械をこう動かしたいから動力をこう動かす、という順番で考えること。逆に、動力をこう動かすと機械はこう動く、と考えることを順運動という。

*注3 回転軸に回転計が組み込まれ、実際の動きをフィードバックすることにより制御信号通りの動きを実現するモーター。



巣立ちの時を待つ機械システムたち

これまでの杉本・武田研究室におけるシンセシス（総合）によってパラレル機構については出口が見えてきたが、杉本・武田研究室では他にもい

くつかの新たな機械システムが考えられている。ここからは現在研究が進められている機械システムを紹介しよう。

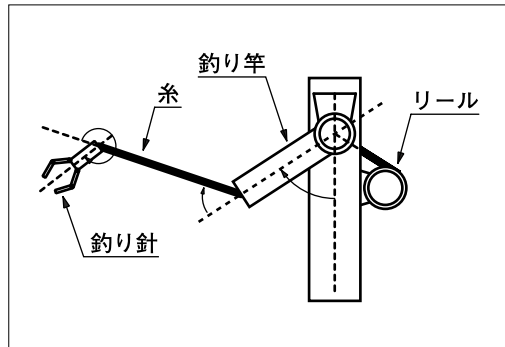
キャスティングマニピュレーター

普通機械というと木材にせよ金属にせよ剛体の組み合わせによって作られるものだが、このキャスティングマニピュレーターの要となるのは柔らかいワイヤーである。これはワイヤーの先に手となるグリッパーを取り付け、それを飛ばして遠くのものをつまもうという機械だ。グリッパーの飛ばし方には打ち出す、投げ飛ばすなどいくつかの方法が考えられているが、杉本・武田研究室では後者の方の投げ釣りもしくは投げ縄の要領でグリッパーを投射する方式で開発が進められている。

この機械の特徴は極めてシンプルな機構ながら大作業領域を実現できることである。その長所を活かした応用例としては、離れたところにいる人物を救助するレスキュー用や、宇宙空間における船外作業用などが考えられていて、その実現が大いに期待されている。しかしながら実現への課題はまだ多く、グリッパーを飛ばす際の投射角、投射速度、ワイヤーの張力をどのようにコントロールすれば狙った場所にピンポイントで投げられるのか、また目標地点に着いたあと、物を掴む際に手首を返すようにしてふわっと持ち上げるには張力をどう制御したらよいのかなど、現在実験と解析が進められている。



キャスティングマニピュレーター実験装置



釣り人に見立てた例

水上走行機械

皆さんはバシリスクトカゲというトカゲをご存知ないだろうか。この中南米に生息するトカゲは驚いたりすると水面を二足で走って逃げることで有名である。杉本・武田研究室ではこのトカゲの動きを観察し、力学の原理と照らし合わせ、陸上ですら難しい二脚での走行という動作を水面で実現させようという壮大な研究を行っている。

水の上を走るためには足で水面を蹴ることで得られる反力が自重を超えていることが必要条件である。さらに足を交互に踏み出すことでバランスを維持し、その場に浮くだけではなく前進する推

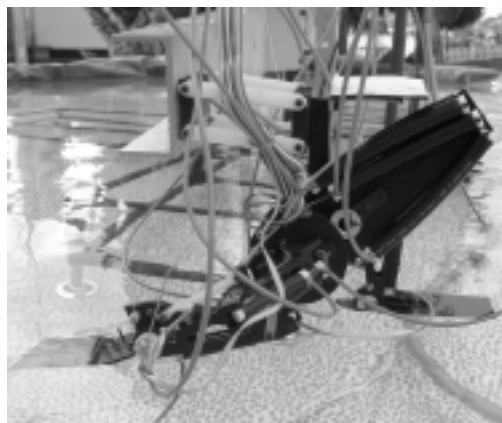


バシリスクトカゲ

進力を生み出さなくてはならない。このような動きを実現するには出来るだけ軽量で素早い動作の可能な動力が適している。そこで杉本・武田研究室では空気シリンダーを使ったアクチュエーターを採用した試作機を用いて実験を行っている。今のところ体を浮かせるだけの反力を生むことには何とか成功したが、水についた足を抜いて次の動作につなげる動きなど、まだまだ課題は多いそうだ。車輪と比べて足という移動手段は多くのエネルギーを消費する代わりに悪路走破性が高い。そのうえ水上も移動できるようになったならば機械の活動領域は大いに広がり新しい可能性が見えてくるだろう。

ここまで、シンセシス（総合）というテーマを説明し、新しく誕生した、または誕生しようとしている機械システムたちを紹介してきたが、今までとは一風変わった機械であることがわかりいただけたことと思う。

杉本・武田研究室では未開発の土地に行く開拓者がごとく、これらの新しい機械システムの考案、機械の製作全てを自前で行い、機械の新たな地平を切り拓いている。機械工学における自給自足の生活、それがシンセシス（総合）の総合たる所以なのだ。「実はこの全て自前というところが将来技術者を目指す学生たちにとって重要なのです。」と杉本先生はおっしゃっていた。機械についてははじめから最後まで一貫して触れることが出来るのは大学が唯一の場なのだそうだ。企業においては高等教育を受けた専門技術者は技術開発の核となり研究を進めることが期待されている。そのため自らの手で工作機械に触れて製作を行う機会がなくなってしまうのが一般的である。しかし



水上走行機械

たとえ設計開発を行う技術者であるとしても、実際に物を作る現場の苦勞を理解し、機械ということに触れる経験を持つということは非常に大事なことである。杉本・武田研究室では新しい機械システムの開発はもちろんのこと、機械に直に触れ、製作の経験を積むというのがもう一つの隠れたテーマであるようだ。

新しいことに挑むということは困難も多い。まして全て自分達の手で行うとなれば尚更である。だが、また同時にそこには大きな喜びが存在するものだ。中には実生活への応用などは特に考えずに進めている研究もあるが、「遊んでるんじゃないんです。楽しんでるんです。」とは、武田先生の言葉である。必要は発明の母とはいうが、こうした開発の一番の原動力は知的好奇心や探究心ではないだろうか。そうして杉本・武田研究室からは大きな可能性を内に秘めたたくさんのアイデアが生まれ、シンセシス（総合）という揺籃の中で育ち、広い世界へと羽ばたいてゆく。

六本の脚が複雑にうごめく巨体に似合わず繊細なバラレル機構。豪快にグリッパーを遠くへ投げ飛ばそうというキャスティングマニピュレーター。水飛沫をあげながら懸命に水面を疾駆する水上走行機械。

紙面の関係上紹介することができた機械システムはこの3点のみでしたが、どうでしたでしょうか。稚拙な筆力ながらその魅力が伝わるよう努力したつもりです。新しく生まれようとする機械シ

ステムたちの先に広がる可能性を皆さんに少しでも感じてもらえたなら記事を書いた者としてこれ以上の喜びはありません。

また、この記事を書くにあたって杉本・武田両先生には大変お世話になりました。お忙しいなかお時間を割いていただき誠にありがとうございます。無事に完成を迎えた記事をここにお届けするとともに、この場を借りてお礼申し上げます。

（鐘ヶ江 俊輔）