

加速度センサ，角速度センサの活用事例

車輪移動型倒立振子の開発にみるセンサの使い方

熊谷正朗

加速度センサと角速度センサを搭載した倒立振子の設計事例を紹介する。傾斜角度そのものを直接把握できない角速度センサだけを搭載すると、センサや周辺回路のわずかな誤差の蓄積により、立ち続けることができないため、重力検知用に加速度センサを併用する。

(編集部)

倒立振子は文字通り、「逆立ちした振り子」です。普通の振り子は図1(a)のように、上方に支持点があり、そこに重りがぶら下がっていて、ゆらゆら揺れるというイメージがあります。もう少し厳密に表せば、運動する物体(剛体)の重心が支持点の真下にあるときは動かず(平衡点^{注1})、いずれかの方向に傾いた状態では、平衡点に戻ろうとする力(復元力)が働きます。これは重力によって引かれるためです。重りは摩擦などがなければいつまでも揺れていますが、普通は徐々に揺れが小さくなって(減衰)、最後には止まります。

その振り子を図1(b)のように逆立ちさせると(重心を支持点の上方に持って行くと)どうなるでしょうか。言うま

でもなく、回転してぶら下がろうとします。

では、完全に重心を支持点の真上に持っていくとどうなるでしょうか。重りは支持点の真すぐ上に乗っているため、左右に傾く力は働かず、動こうとはしません。ここも平衡点の一つです。ただし、ほんの少しでも傾くと、ますます倒す方向に力が働くため、あっという間に倒れてしまいます。

● ほうきが倒れないための制御方法

この、倒れるのが当たり前である逆立ちした振り子を、倒れないように立たせ続けることは可能です。小学校で掃除の時間にほうきを手の上に立てて遊んだ経験のある方も多いと思います。これがまさに倒立振子の状態です。倒れるようすを見ながら、それに合わせて手を動かすと、立たせ続けることができます。

この倒立振子は、昔から制御系に携わるエンジニアの関心事でした。やり方によってはできることは分かる、では「具体的にどのように」という問題の明確さや、一般に入力の一つで制御すべき値が4種類という手ごろな複雑さから、新しい制御理論はまず、倒立振子で試すという話もあります(ファジー制御で倒立振子など)。

● 倒立振子の考え方はロボットの足にも応用されている

その一方で近年は、移動ロボットの足として注目を集めています。乗り物として有名なセグウェイ(Segway)も、

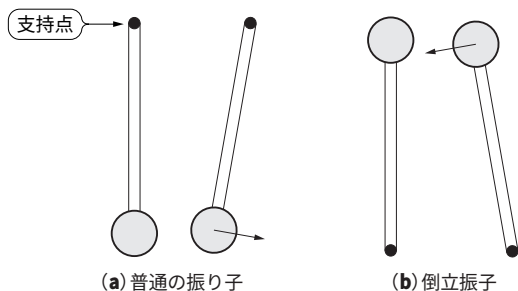


図1 振り子と逆立ちした振り子

注1：先の平衡点は安定平衡点，この平衡点是不安定平衡点。

Keyword

加速度センサ，角速度センサ，平衡点，ステッピング・モータ，H8/3052，ADXRS150，ADXL202

人間を振り子の一部とする倒立振り子です。また日立製作所のロボットのEMIEWも2車輪で動きます。何もしないと倒れてしまうということは危険に見えますが、常にバランスを取ることで思いがけない外部からの力に対応でき、また、機動性を向上させることができます。

そのほか、目に見えにくいのですが、歩行ロボットもその姿勢制御に倒立振子的な考えを入れている物があります。村田製作所のムラタセイサク君2号も、反動車型と呼ばれる倒立振り子に分類されます。このような倒立振り子においては、当然ですが、その傾きをいかに知るかが重要です^{注2}。本記事では、**図1**に示す倒立振り子の解説を通して、センサ・デバイスの選定、信号の扱い、ソフトウェア実装について述べます。

1. 製作する倒立振り子の仕様を決める

今回紹介する倒立振り子は、**写真1**に示すような機体で、筆者がかかわった倒立振り子の中で6台目に当たります^{注3}。この倒立振り子の開発動機は、卒業研究をする学生が「玉乗りロボットを作りたい」と言い出したことです。いきなり玉は無理だからと説得して^{注4}、「パイプ乗りロボット」にしました。その上で、卒業研究の範囲で手軽にまとめるために、以下のようなコンセプトとしました。

● 駆動はステッピング・モータで行う

世間一般には、DCサーボ・モータ+減速機をトルク指令で動かしますが、さまざまな手間が増えます。そのため、扱いやすいステッピング・モータの軸に車輪を取り付け、直接、駆動しました。ついでにモータは左右独立にして、旋回などを可能にしました。

● 電池やコンピュータを搭載した自立型であること

倒立振り子に限らず、実験室で装置を作るときは、電源を外に置き、制御もパソコンで、という形が手っ取り早いでしょう。ただし、今回の倒立振り子の場合は、電線を引っ張ると制御にその影響が出やすいこと、パイプ乗りという移動を前提にした物であることから、電源もコンピュータも搭載した自立型にしました^{注5}。

前者は、あくまで「手抜き」のために決めたことですが、これが想定外に極めて高い安定性をもたらしました。後者についても、いきなりデモしたりするのにとても便利な出

写真1
加速度センサと角速度センサを搭載した倒立振り子



来となり、「バランス・ロボット」として、これまでの作品の中で圧倒的な稼働率を誇っています。なお、**写真1**はパイプ乗りのための機能ははずした、単品で床に立つ機体です。

2. 倒れないように制御する方法

倒れる物を立てるためには、引き倒そうとする重力以上に、逆向きに作用する力を与え、それを調整する必要があります。本機の場合は、車輪で機体の下端を左右に加速することで、上が倒れてくるよりも速く、下端を動かして立て直します^{注6}。

● 考慮すべき四つの状態がある

図2に倒立振り子の制御において考慮する四つの状態を示します。(0)は目標とする状態です。機体は水平方向の目

注2：ムラタセイサク君もその本業は村田製作所のセンサの広報と推測される。

注3：倒立振り子マニアというわけではないが、気が付いたら研究用や学生実験などで7台、今年さらに2台追加の予定…

注4：今回の車輪型は1方向にしか倒れないが、玉だと2方向に倒れるほか、ねじれも生じる。開発事例もほとんど見られない。

注5：持ち運んで簡単にデモができるように、という隠れた目的もあった。メカトロニクスの講義や高校での出張講義などにおいて、「種も仕掛けもありますが」と前置きしてから立たせると、それなりに関心を引きける。

注6：厳密には全体を加速することで生じる慣性力により、重力による転倒のモーメントを打ち消したり、さらに立て直したりする。