

# ロボットの転倒と転倒回避に関する基本問題と その解、およびシミュレーション

鷲田豊明\*

2017年4月28日

## 概要

人は柔軟な関節を持っている。この関節を動かしたり止めたりしながらしなやかな体の動きを作っている。関節のしなやかさは、人間の肉体の持つ冗長性、ないしはレジリエンス（復元性）の根本を作っているものである。関節が硬い人は、怪我をしやすいと言われるだろう。柔軟な関節をしたりして、人は関節を柔らかくしようとする。一方、ロボットは、硬くて、頑丈で、精密な関節だ。確かに、関節は動く。しかし、そこに冗長性はあまりない。だから倒れたら壊れてしまう場合が多い。小さいロボットならば、転んでも構わないだろうが、少し大きくなるとそんな余裕はない。もちろん、ロボットに倒れない仕組みは組み込めるだろう。が、必要なのは、倒れても大丈夫な、人のような柔軟性を持った体の仕組みをロボットにも組み込むことである。そのために、まず、ロボットが倒れる、倒れない、倒さない基礎的（ファンダメンタル）な条件を求めてみた。

理論的な考察においては、時間を考慮せず分析できる方法で、転倒の臨界角を求め、さらに運動方程式を確定して時間を入れたダイナミックな解を求めた。さらに、数値シミュレーションを実施した。

## 1 問題

ここで、ロボットの転倒とその回避に関する基本的な問題を考える。

人間が普通に立っている状態から、わずかに傾いたとして、そのまま立っている状態を維持しようと思ったら、様々な筋肉を使ってバランスを取ろうとするだろう。このような状況をロボットでも再現したい。そのために考えるべき、最も基本的な問題を考える。

図1を見ていただきたい。二次元で考えている。いま、CDとABという二本の硬い棒、及びそれらが関節Aでつながっているシステムを考える。Aという関節は、人のそれと同じように、自由に動くことができる。ただしここでは、固定もできると考えよう2次元で考えているので、ここでは左右にしか動かない。

重要な仮定として、二つの棒は硬いけれども重さはないと考える。唯一の重さは、B点に集中して存在している。質量を $m$ としよう。十分な重さをイメージしたほうがわかりやすいかもしれないが、その重さは実はさほど大きな問題ではない。何しろ $m > 0$ である。一見質量が一様に分布している剛体考えた方がリアルだが、そのぶん表現が複雑になる。ここで必要なのは、問題が認識できることであり、そんな点では、質量一点集中の方がはるかに単純で有用である。

いま、B点がA点のちょうど真上にあたるころから、わずかに右にずれて、傾きだしたとする。関節が完全に自由であれば、この縦棒ABは加速度を持って回転しながら右に転倒してしまう。CDはそのままである。何しろ関節が完全に自由なのだから。

---

\*上智大学大学院地球環境学研究科

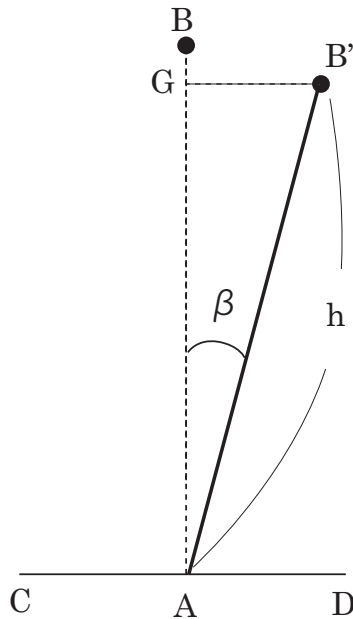


図 1: 基本システム

次に、A という関節がある場所で固定化する。ただし、ダイナミックな状況は考えない。ある場所で、静的に固定化するのだ。静的に固定化しても大丈夫な範囲はどうなるだろう。ちょっと考えればわかる。重さは、B にしかないことが肝だ。B がちょうど D の真上に来たところが分岐点だ。これより右で固定化されれば、このシステムは右に回転して転倒するだろう。棒には重さが無いことがポイントだ。重さは、B にしかない。つまり、まっすぐに立った元の棒のいちからの角度  $\beta$  が B 点が D 点の真上になる以上に大きくなったらこのシステムは、A で関節が固定化していても、転倒するのだ。しかし、 $\beta$  がそれ以下だったら、システムは復元する。逆に左側に揺れてどうなるかは、今のところ考えない。

次にダイナミックは状況を考える。関節 A は任意のときに任意の角度で自由に固定化できたとする。今、B が頂点にある状態から、少しだけ右にずらして手を離れたとする。そのまま回転して、何もしなければ倒れるのだが、ある時点で固定化したとする。例えば、B がちょうど D の真上にある時に固定化したとすると、どうなるだろう。静的な状況の場合は、この場所で固定化すれば、転倒を避ける可能性があったが、ダイナミックな状況では、当然、この場所を行き過ぎてしまうので、転倒してしまう。(図 2 を参照)

今、頂点で話したら間髪を容れずに固定化したら、明らかに倒れないだろう。一方、D の真上で固定化したら倒れる。ということは、そのどこか中間でも、転倒か復元かを分ける傾き  $\beta$  の点があるということである。

問題は、その転倒と復元を分ける臨界的な傾き  $\beta$  を求めることである。

## 2 解答

問題は一見複雑だが、実は簡単な仕組みでできている。

自由な関節の状態で、頂点から微妙に離れた B 点は、位置エネルギーを運動エネルギーに変え

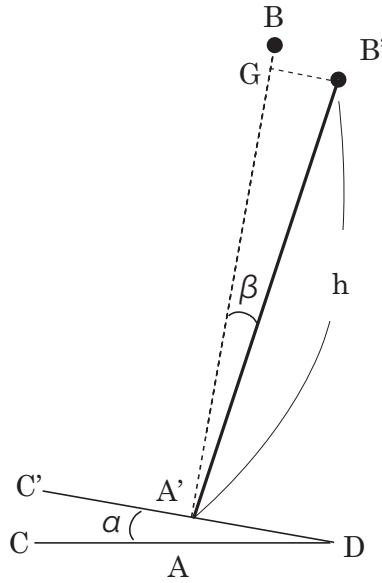


図 2: 関節固定とダイナミクス

て、動き始める。エネルギーは保存されると考える。固定化されたのちに、ある状況で運動をやめるわけである。二つの条件がある。

第一の条件は、発生した運動エネルギーが再び位置エネルギーに変わって、運動が止まることである。これは、関節が固定化されたのちに図 2 にあるように、角度  $\alpha$  が現れるために、位置エネルギーが増大し、発生した運動エネルギーを全て変換してしまうことである。変化する縦幅を  $\Delta R$  とすると、エネルギーの変化は  $mg\Delta R$  である。 $g$  は重力定数である。一旦運動エネルギーに変わっても、結局位置エネルギーになるのだから、 $mg$  が変わらないということは、 $B$  が同じ高さに戻った時に運動は終わるのということである。実に単純である。

第二の条件は、その止まったところは、点  $D$  の真上でなければならないということである。これよりも右だったら、右に転倒してしまうし、求めるべきは臨界点であるから、それより左も答えではない。

順を追って考えよう。

## 2.1 関節が固定されるまでの動き

まず、関節が固定されるまでの動きを考える。

いま、角度  $\beta$  のところで固定化されたとしよう。この時まで失った位置エネルギーを求める。先にも述べたように  $mg$  は一定なので、図 3 の  $BG$  の幅を求める。

$ABB'$  は二等辺三角形なので、

$$\beta + \sigma = \frac{\pi}{2}$$

である。そこから、 $\eta = \beta/2$  であることは簡単に求まる。 $\beta = \pi/2$  では、直角二等辺三角形になってしまうので、このことが確かめられる。そうすると、 $B'G$  は、 $h \sin \beta$  であるから、 $BG$  を  $q_1$  と置くと、

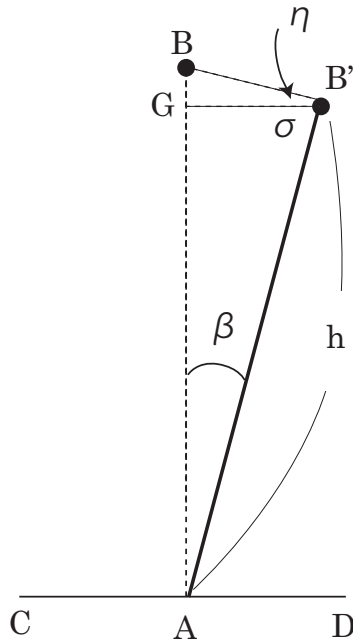


図 3: 関節固定されるまで

$$q_1 = h \sin \beta \tan \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

となることがわかる。

## 2.2 関節が固定化されてからの動き

次に、関節が固定化されてからの動きを考える (図 4)。

高さを見ることになる。まず、A' 点から、CD に垂直お降ろされた点 E までの長さが  $\alpha$  によって持ち上げられた分である。それを  $q_2$  で表すと、A'D の長さを  $l_2$  として、

$$q_2 = l_2 \sin \alpha$$

である。

これによって相殺される B の効果分は、先に求めた  $q_1$  ではない。さらに  $\alpha$  だけ回転しているので、その低下分も考慮しなければならない。こう考えればいだろう。まず、点 E で角度  $\alpha + \beta$  だけ回転させて、A'E の分、真上にシフトさせれば、図の状況が現れる。

となると、式 (1) の角度を  $\beta$  から  $\alpha + \beta$  に変えたものが、回転による B の低下分  $q'_1$  である。すなわち、

$$q'_1 = h \sin(\alpha + \beta) \tan \frac{\alpha + \beta}{2}$$

である。つまり、 $q'_1 = q_2$  であれば、低下分と上昇分が相殺しあっている、すなわち、B の位置が変わらない状況を表している。

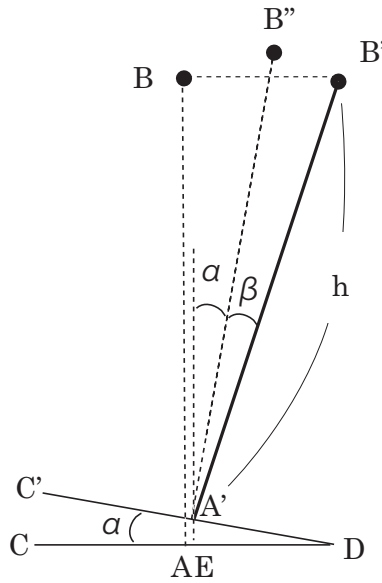


図 4: 関節固定された後

$$h \sin(\alpha + \beta) \tan \frac{\alpha + \beta}{2} = l_2 \sin \alpha \quad (2)$$

となる。

この状況は、失った位置エネルギーを完全に回復した状況なので、運動エネルギーはゼロになっている。止まるのである。ただし、エネルギー的にはこう言えても、回転のモーメントが働けば、この状況は崩れるというか、実現しない。

### 2.3 バランスが取れているための条件

そこで、最後に考察すべき問題は、運動エネルギーがなくなった状態で、停止しなければならないということである。停止といっても、臨界点と言うことで、実際は微妙にバランスは崩れて動き出すのだが、理論的にも止まる停止点である。それは、最終的に B が D の真上になければならないということである。これは一見静的に固定化させた臨界点と似ているようだが、関節が途中で固定化されているところだけが違う。

なぜ、ここまでギリギリのところを求めるのか、それは、システムの制御に使う時間をできるだけ多くするためである。

図 5 に状況をやや誇張して描いた。D が真上に来る条件を求めるのである。エネルギー保存則が、ひたすら縦の条件だったのに対して、バランスの条件は、ひたすら横の条件である。ここでは、BB' の長さが AD に一致すれば良い。

まず、B'H の長さであるが、これは、三角形 A'B'H をみたときに、次のように表せる。

$$B'H = h \sin(\alpha + \beta)$$

これは、図から明らかなように、DE に一致する。一方、BH と AE は等しいから、AE を求め

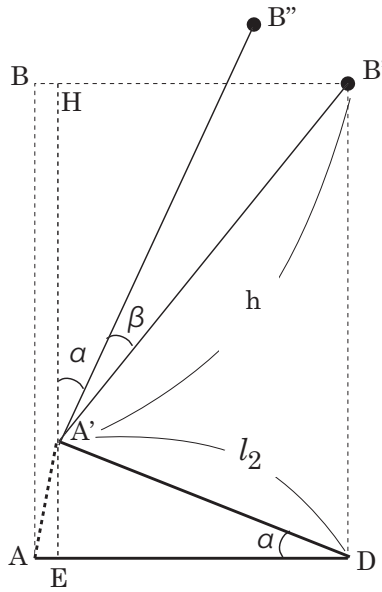


図 5: 静止後のバランス条件

る。まず、 $A'E$  が、 $l_2 \sin \alpha$  であることがわかる。さらに、角  $A'AE$  は  $(\pi - \alpha)/2$ 、また、

$$\tan(\angle A'AE) = \frac{A'E}{AE}$$

だから、 $A'D$  が二等辺三角形であることを考慮すれば、

$$AE = \frac{A'E}{\tan \frac{\pi - \alpha}{2}} = \frac{l_2 \sin \alpha}{\tan \frac{\pi - \alpha}{2}}$$

となる。したがって、 $DE + EA = l_2$  だから、

$$l_2 = \frac{l_2 \sin \alpha}{\tan \frac{\pi - \alpha}{2}} + h \sin(\alpha + \beta) \quad (3)$$

である。

## 2.4 モデル分析まとめ

結局、(2) 式と (3) 式を同時に満たすような  $\beta$  が求める臨界角なのである。

そのとき、同時に  $\alpha$  も求められることになる。ここでは、与えられた条件の中で、転倒しないためのギリギリの関節固定化の角度を求めた。重さのない棒など、きつい仮定が入っているが、できるだけ単純な状況の中で、原理的なものを求めるためにやむを得ない。

一見、関節を止めた時のお守りの動きの速さなどが関係しそうだったが、そうした速さも、質量も全く関係なく、横と縦の棒の長さ、厳密にはその比だけに依存した答えになった。

### 3 数値シミュレーション

(2) 式と (3) 式と連立させれば、 $h$  と  $l_2$  が与えられた元での  $\alpha$  と  $\beta$  を求められそうだが、三角関数が入った非線形関数の連立方程式であり、簡単には解けない。そこで、コンピュータでシミュレーション解を出して見る。

式を見れば明らかなように、 $h$  と  $l_2$  は、その比率だけが問題になる。そこで、常に  $h = 1$  として、与えられた  $l_2$  に対する解を求めてみよう。解を求めるために作成した JAVA の関数をそのまま掲載しておく。

```
////////////////////////////////////
// 解を求めるための JAVA 関数
void calculation(){
    double e1;
    double e2;
    double Error;
    double Length = 1.0;
    double res_alpha ;
    double res_beta ;
    double min_Error;
    for(double Height=1.0;Height<=20;Height += 0.1){
        res_alpha = 0;
        res_beta = 0;
        min_Error = 10000;
        for (double s1 = 0.0001; s1 < 0.5; s1 += 0.0001) {
            double alpha = s1 * (PI / 2.0);
            for (double s2 = 0.0001; s2 < 0.5; s2 += 0.0001) {
                double beta = s2 * (PI / 2.0);
                e1 = Height * sin(alpha + beta) * tan((alpha + beta) / 2.0)
                    - Length * sin(alpha);
                e2 = (Length * sin(alpha)) / tan((PI - alpha) / 2.0)
                    + Height * sin(alpha + beta) - Length;
                Error = e1 * e1 + e2 * e2;
                if (Error < min_Error) {
                    min_Error = Error;
                    res_alpha = alpha;
                    res_beta = beta;
                }
            }
        }
        System.out.println(String.format(
            "Height:%5.2f Minimum alpha: %8.6f    beta:%8.6f Error:%12.10f"
            , Height, res_alpha, res_beta, min_Error));
    }
}
```

////////////////////////////////////

要するに、(2) 式と (3) 式それぞれに、両辺の誤差を  $e_1$  と  $e_2$  で捉えて、平方和を最小にする  $\alpha$  と  $\beta$  とベータをしらみつぶしに調べているだけである（引き算の方向は、二つの式で逆になっている。結局、平方和にするので関係はないのだが、見やすくしただけである）。誤差平方和が、ほぼゼロになればそれが答えである。

$\alpha$  と  $\beta$  の刻み方は、90 度 ( $\pi/2$ ) を 5000 個に刻んで、それを一つずつ調べている。また、高さを水平の棒に対して、等しい状態、すなわち 1 から 20 倍までを、0.1 刻みで調べている。すなわち、高さの比は、200 個で、それぞれについて、二つの式を満足させる  $\alpha$  と  $\beta$  を求めているわけである。

計算結果の誤差は、高さの比が 1:1 のときに最も小さく 0.0000000082 である。高さの比がここで調べた中で最も大きい 20.0 のときに 0.0000011608 である。いずれも極めてゼロに近く、ほぼ解であると考えて間違いのないだろう。刻み方をもっと細かくすれば、さらに誤差を小さくできることが予想される。ただ、高さが高くなるほど誤差は僅かながら大きくなっている。その理由は、高さが高いと、微妙なバランスが求められると考えても良いだろう。

その結果の特徴は、まず、理由はまだ正直わからないのだが、常に  $\alpha$  と  $\beta$  は等しくなる。したがって、ここでは、関節を固定する角度  $\beta$  と高さの関係を図 6 示そう。角度は、ラディアンではなく、度に変換し示している。

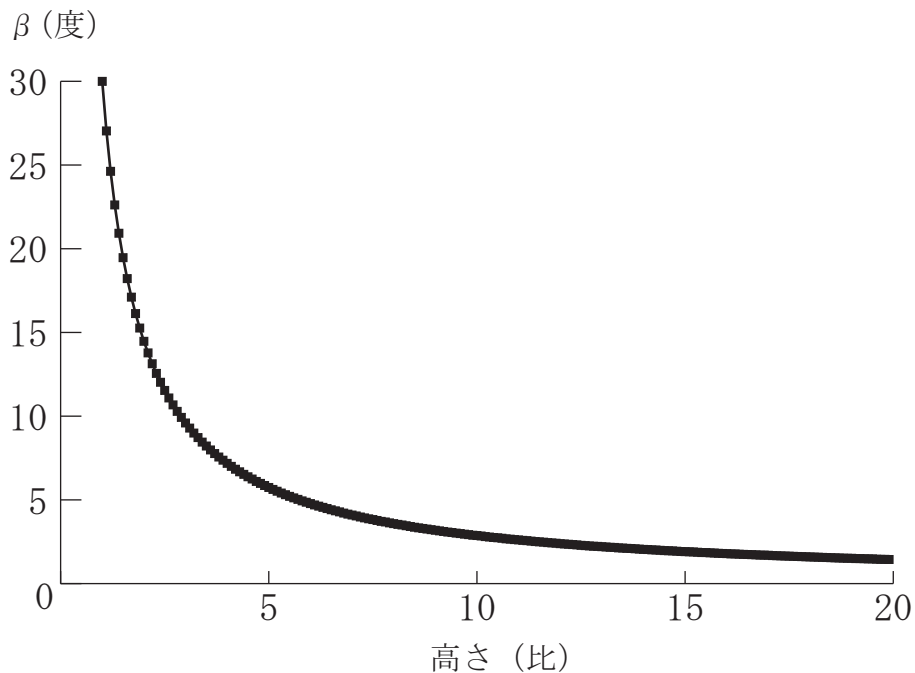


図 6: 水平を 1 とした高さと  $\beta$  の関係

高さが 1 のとき、すなわち、横棒と縦棒が同じとき、角度は 29.99697622 度、ほぼ 30 度だ。何か理由がありそうな角度である。 $\alpha$  も同じになることは先に述べておいた。綺麗に 90 度を三等分する角度になっている。ただ、この角度は大きい。つまり、頂点で手を離して、30 度傾くまで、自由な関節の回転を放置しておいて良いのだ。その後固定化すると、ギリギリ転倒を回避できる。高さが低いからである。

小さなロボットが転倒しにくい理由はここにある。



また、比率で見た高さが高くなると、最初は急速に関節を固定化するまでの角度が小さくなっていく。その後は、少しずつ低下する。すなわち、高さが高くなればなるほど、転倒しないために関節を固定化しなければならないタイミングは早くなるのである。僅かに傾いたら、即固定化ということになっていく。

それでも、高さが10のときに、 $\beta = 2.870976923$ 度、ほぼ3度の余裕がある。3度傾いたら、関節を固定化しなければならないのである。高いと、微妙な調整が必要になる。

## 4 結果を人に応用してみる

これだけでも面白い結果だが、人に応用するともっと興味深い。例えば、私の身長は182cmである。一方、足のくるぶしの関節から足のつま先までの長さは18cmくらいである。高さの比は、10.1である。

上の計算で、10.1の限界度、 $\beta$ は、2.843990611度である。つまり、足前に出したりせずに、動かさずに立った状態を維持するためには、2.8度、前に傾いたら筋肉を緊張させなければならないのである。

確かに、体を前にわずかに倒そうとすると筋肉を硬直させるが、この角度が、2.8度だよとこのシミュレーション結果は示している。もちろん、人間の体は質量が分布しているので、理論モデルで示したような質量の一点集中とは違っている。

## 5 時間を考慮したシミュレーション

これまでの分析で、時間は何の役割も果たしていない。ただ、位置エネルギーが保存されることを条件に分析しているだけである。そこで、時間を入れたダイナミックな動きをシミュレーションしてみよう。縦棒が自由に回転を始めて、関節によって動きが固定されるまでの時間、固定されて後の運動という二つのフェーズを考慮に入れる。

### 5.1 関節固定までの運動方程式

垂直に立った状態から、関節が固定化されるまでの運動を調べよう。厳密には、垂直に立った状態から運動は発生しないので、微妙な初速度  $v_0$  を与えることになる。

円弧  $s$  に沿った運動を考えて、加速度と力の関係から次の式が成立する<sup>1</sup>。

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = mg \sin \theta$$

$m$  は B 点の質量、 $t$  は時間、 $g$  は重力加速度、 $\theta$  は頂点から成す角度である。 $m$  は相殺されるので、次のように変形できる。

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = g \sin \theta.$$

結局、この運動には、質点の重さは関係しないことがわかる。一方、高さは  $h$  で、 $s = h\theta$  だから、運動方程式は、

$$h \frac{d^2 \theta}{dt^2} = g \sin \theta$$

<sup>1</sup>以下の考察にあたり [1] を参照させていただいた。振り子とは逆向きだが、運動方程式は、形式は同じで向きが違うようになる。

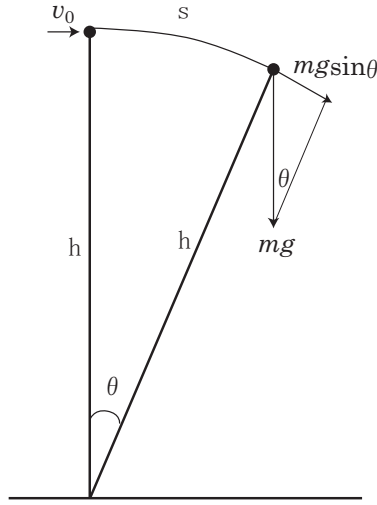


図 7: 関節が固定化されるまでの運動

ここで、 $\theta$  の範囲は、十分小さいと仮定しよう。実際われわれが考察するのはロボットが直立した状態からの微妙な揺れのようなものだから、この仮定に無理はない。すると、 $\sin \theta \simeq \theta$  の近似式が成り立つ。あるいは、そう近似しても、誤差はさほど大きくなる。すると、運動方程式は、

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{g}{h}\theta \quad (4)$$

と表される。この二階微分方程式の一般解は、次のようになる。

$$\theta = \phi_1 e^{\sqrt{\frac{g}{h}}t} + \phi_2 e^{-\sqrt{\frac{g}{h}}t} \quad (5)$$

$\phi_1, \phi_2$  は未定乗数である。また、角速度は次のようになる。

$$\frac{d\theta}{dt} = \phi_1 \sqrt{\frac{g}{h}} e^{\sqrt{\frac{g}{h}}t} - \phi_2 \sqrt{\frac{g}{h}} e^{-\sqrt{\frac{g}{h}}t} \quad (6)$$

さらに時間微分することによって次の式を得て、一般解の妥当性を確認できる。

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \phi_1 \frac{g}{h} e^{\sqrt{\frac{g}{h}}t} + \phi_2 \frac{g}{h} e^{-\sqrt{\frac{g}{h}}t} = \frac{g}{h}\theta$$

$\phi_1, \phi_2$  を求めよう。初期状態では B は頂点にあるので、(5) に  $t = 0, \theta = 0$  を代入することによって、

$$\phi_1 + \phi_2 = 0$$

また、極めて小さな初速度を  $v_0$  とすると、 $h$  で割ることによって角速度に変換し、

$$\frac{v_0}{h} = \phi_1 \sqrt{\frac{g}{h}} - \phi_2 \sqrt{\frac{g}{h}}$$

上の二つの式によって、 $\phi_1, \phi_2$  が決定でき、それを (5) 式に代入することによって、次の式を得る。

$$\theta = \frac{v_0}{2\sqrt{gh}} \left( e^{\sqrt{\frac{g}{h}}t} - e^{-\sqrt{\frac{g}{h}}t} \right) \quad (7)$$

時間と縦棒が倒れていく角度を示している。

## 5.2 関節固定までのシミュレーション

(7) を数値シミュレーションした結果を図 8 に示している。

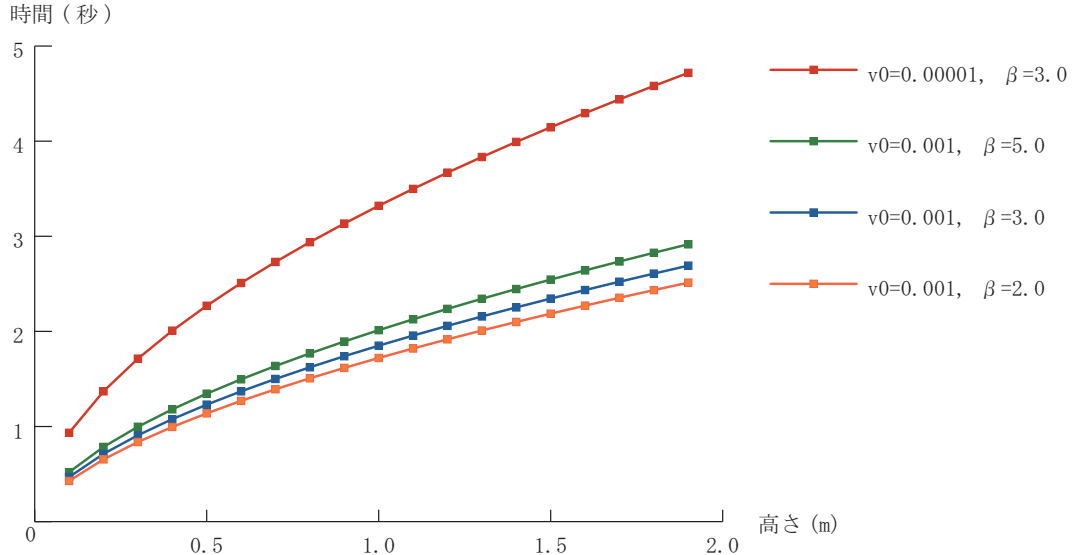


図 8: 関節が固定化されるまでの時間

横軸は棒の高さ (m) で、縦軸は棒が指定した角度まで倒れるまでの時間である。描かれたグラフの、下の三つの曲線は、初速度を 0.001 (m/sec) に固定して、到達すべき関節を固定化する角度  $\beta$  を 2.0 度、3.0 度、5.0 度に変えたときの図である。そして、一番上の、少し外れた図は、到達角度を 0.3 度、初速度を 1/100 の 0.00001 にしたときの図である。

到達角度、すなわち関節を固定化する角度を変えても、それほど大きくはそれまでにかかる時間は変わらない。また、初速度を小さくすると確かにゆっくりと倒れる。初速度の低下は、ゆっくりとした運動をもたらすが、初速度をゼロに近づければ近づけるほど倒れるまでの時間は無限に増えていくかというところでもない。初速度を小さくしていくと、時間 10 秒くらいのところに特異点があることがわかる。

## 5.3 関節固定された後の運動方程式

固定化されたのちの運動として最も重要な点は、回転の軸が A 点から D 点に変わることである (図 9)。

B が頂点から B' まで回転し、角度が  $\beta$  になったときに固定化される。ここまでの軸は A である。ここで固定化された途端、軸は D となる。その後の B の運動を運動方程式で表そう。今、角度を D の真上の点からの角度にしよう。すなわち、D を軸として左回転を正とするのである。

まず、この回転の腕 DB' の長さを  $k$  としよう。この長さは、ピタゴラスの定理を使って次のように表される。

$$k = \sqrt{(l_2 - h \sin \beta)^2 + h^2 \cos^2 \beta}$$

VB が  $h \cos \beta$ 、VD が  $l_2 - h \sin \beta$  であることから求めている。また、初期角度  $\theta_0$  は、次のよ

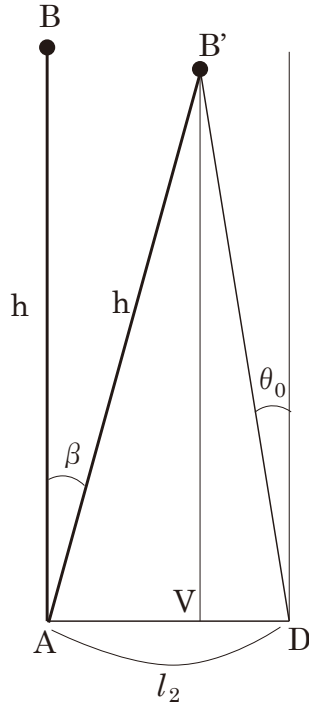


図 9: 関節が固定化されて後の運動

うになる。

$$\theta_0 = \arctan \frac{l_2 - h \sin \beta}{h \cos \beta}$$

運動方程式は、腕の長さが変わるだけで、形は固定化されるまでと同じである。

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{g}{k}\theta \quad (8)$$

ただし、初期速度は、B点を右に回転させるように与えられる。すなわち、負の回転の力になるのだが、その力は小さく、結局その方向への速度はゼロになり、左回転の力が優位になっていくという構造である。

$$\theta = \phi_1 e^{\sqrt{\frac{g}{k}}t} + \phi_2 e^{-\sqrt{\frac{g}{k}}t} \quad (9)$$

前の場合と同様に  $\phi_1, \phi_2$  は未定乗数である。また、角速度は次のようになる。

$$\frac{d\theta}{dt} = \phi_1 \sqrt{\frac{g}{k}} e^{\sqrt{\frac{g}{k}}t} - \phi_2 \sqrt{\frac{g}{k}} e^{-\sqrt{\frac{g}{k}}t} \quad (10)$$

$t = 0$  で、初期角度  $\theta_0$  であるから、

$$\phi_1 + \phi_2 = \theta_0$$

また、初速度  $v_0$  は、 $\beta$  の回転についての速度が初速度になる。エネルギー保存則を使うと、次の式を得る。

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = h(1 - \cos \beta)mg$$

したがって、

$$v_0 = \sqrt{2h(1 - \cos \beta)g}$$

高さ	1
横 (12)	0.1
$\beta$ (度)	2.870976923
$\theta_0$ (度)	2.861016
$k$	1.0006
初速度 $v_0$	-0.1569
$\phi_1$	0.000077
$\phi_2$	0.049858

表 1: シミュレーション設定

この  $v_0$  を用いると、

$$\frac{v_0}{k} = \phi_1 \sqrt{\frac{g}{k}} - \phi_2 \sqrt{\frac{g}{k}}$$

となり、 $\phi_1, \phi_2$  は次のように求められる。

$$\phi_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{v_0}{\sqrt{kg}} - \theta_0 \right)$$

$$\phi_2 = \frac{1}{2} \left( 3\theta_0 - \frac{v_0}{\sqrt{kg}} \right)$$

これを (9) に代入することによって、初期条件に適合した運動方程式を得ることができる。

## 5.4 関節が固定された後のシミュレーション

関節が固定化されたのちの運動をシミュレーションしてみよう。

最初の数値シミュレーションで、高さと横の非が 1:10 のときの臨界角度  $\beta$  を求めた。 $\beta = 2.870976923$  である。この場合の B 点の運動を調べよう。この前提から、パラメータを計算できる (表 1)。それを元に角度と速度を計算したのが図 10 である。

初期速度が右回りである負値であるから、だんだん角度ゼロ、すなわち垂直に近づいていく。しかし、その後、エネルギーを失って速度がゼロになりだんだん左回転で落ちていく。

## 6 逆さ振り子としてのロボット

NAO は、ただ立っているとき、小さく体を揺らしている。これは ALDEBALAN の技術者が、より生きているように見せようとした工夫だろう。実際そう見える。ただこれが、NAO 自身にとって必要なこととは思えない。問題は、なぜ体を揺らすことが生きているように見えるために必要なかということだ。結局それは、人もまた、立っている時でも体を微妙に揺らしているからだ。人の場合は、体を揺らせることによって直立状態を維持できる、という必要においてそうなのだ。無意識に体の姿勢を制御している。

この揺らせることによって直立を維持するメカニズムの基本的なところを理論モデルとシミュレーションで示してきた。

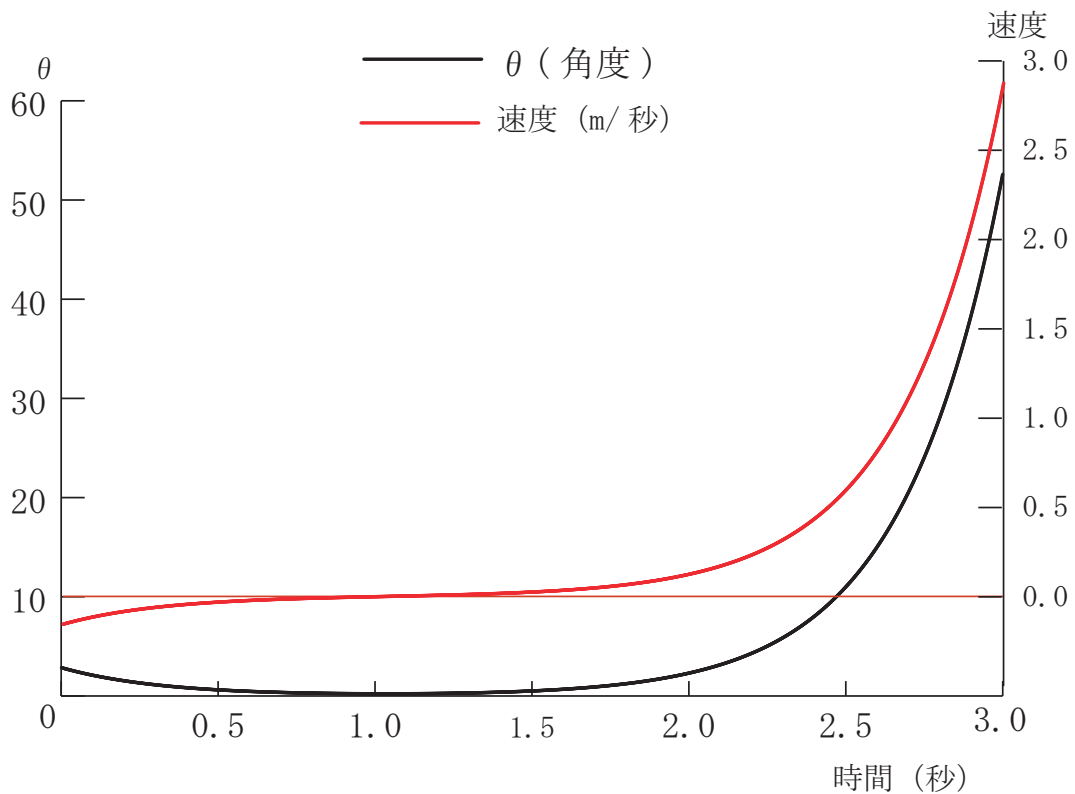


図 10: 関節が固定化された後の運動

理論モデルで示したように、直立構造の運動方程式は、単振り子の運動方程式とよく似ている。同じように見える。ただ、加速度の方向が逆向きになっていて、三角関数ではなく指数関数でそれが解けるようになっている。

下向きのたん振り子は、それ自体に、あるいは内生的に、復元力が働くのだが、逆さまの振り子であるロボットは（現在の多くのロボットは、NAO も含めて逆さ振り子とは言えない。新しい設計思想で作られるロボットのことを意味する）、それ自体は、転倒が基本なのだ。それに対する外生的な揺り戻しが生じることによって転倒を微妙に避けている。このような姿勢制御によって、直立が維持される。そのプロセスは、結局、揺れている状態と同じになるのだ。

この揺れは、この立っている状態に冗長性を生むというもう一つの、とても大事な側面を持っている。単なる剛体であれば、ちょっとした攪乱としての傾きで倒れてしまう。しかし、常に揺れながら状態を直して入れば、攪乱を吸収できるゆとりが出てくる。

スポーツでは、膝や腰や腕を柔軟に使うことが大切なこととして求められる。人間のさまざまなしなやかさは、関節の自由度の大きさによって確保されている。

そのようなロボットをイメージすることがとても大切だ。

## 参考文献

- [1] 小西克享, 2014, 「単振り子の振動の近似解と厳密解」(埼玉工業大学 機械工学学習支援セミナー) .

[http://www.sit.ac.jp/user/konishi/JPN/L\\_Support/SupportPDF/SimplePendulum.pdf](http://www.sit.ac.jp/user/konishi/JPN/L_Support/SupportPDF/SimplePendulum.pdf)