

LEGO による機械の再現

—二足歩行ロボット—

上原 慈元

1. はじめに

今回、自分のグループは作るものが一定しなかった。最終的に二足歩行に落ち着いたが、キャタピラ→四足歩行→二足歩行となったために作品が完成していない。そのため、ほとんどが資料からの引用になってしまうことを、まず始めに断っておきたい。また、本来の二足歩行ロボットは、複数のサーボモーターと関節による動作で、プログラムの制御するものであり、ここで紹介する LEGO の作品は、人間の二足歩行を模した機構の組み合わせに過ぎない。そのため、実際にロボットを組み立てるときの参考にはならないだろう。

2. 二足歩行とは

一口に二足歩行と言っても、恐竜類や鳥類などにも二足歩行は見られるし、訓練をすれば犬や猫などの他の動物でもできる。ヒトの行う二足歩行は、特に直立二足歩行と呼ばれ、日常的にこれを行うことができるのは、ヒトとペンギンだけである。

3. LEGO における機構の再現

今回二足歩行を再現するに当たって、プラモデルのロボットの足を参考に機構を組んだ。

3.1. スライド機構



図1 Slider Crank Mechanism

腿の裏側に当たる部分にスライド機構を使用した。伸び縮みする筋肉とは違って硬いブロックで伸縮を表現するために、スライド機構によって伸びた部分を引き出せるようになる。

3.2. リンク機構

その他の脚の構造はすべてリンク機構を使用した。上記のスライド機構と合わせてひざ、足首を一度に再現できる(足首に関しては動力がないとまともに動かないが)。本当なら全て伸縮させたいのだが。



図2 Approximate Four-Bar, Ellipse Linkage of the Third Kind(手頃なものがなかったため代用)

4. 実際の動作

製作した機構の実際の動作を確認してみる。

図3は、点が関節、四角で囲まれている部分がスライド機構である。伸ばした状態では膝関節が伸びきっていて、スライド機構が下がっている。

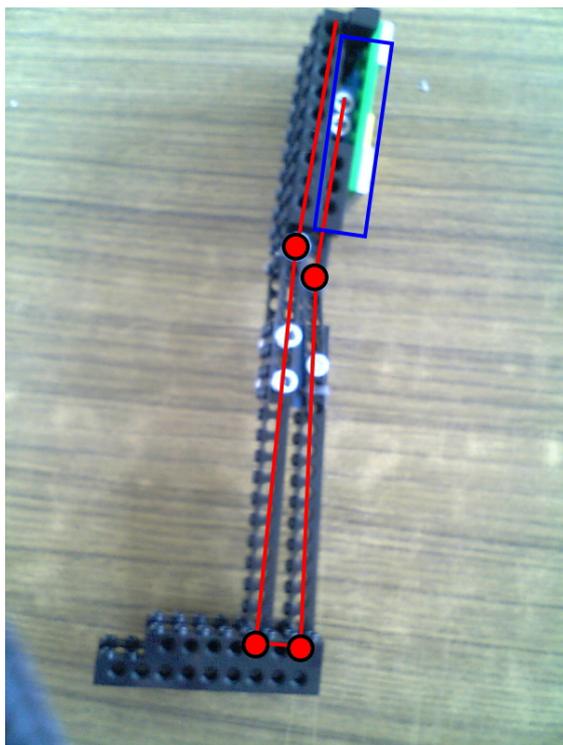


図3 伸ばした状態

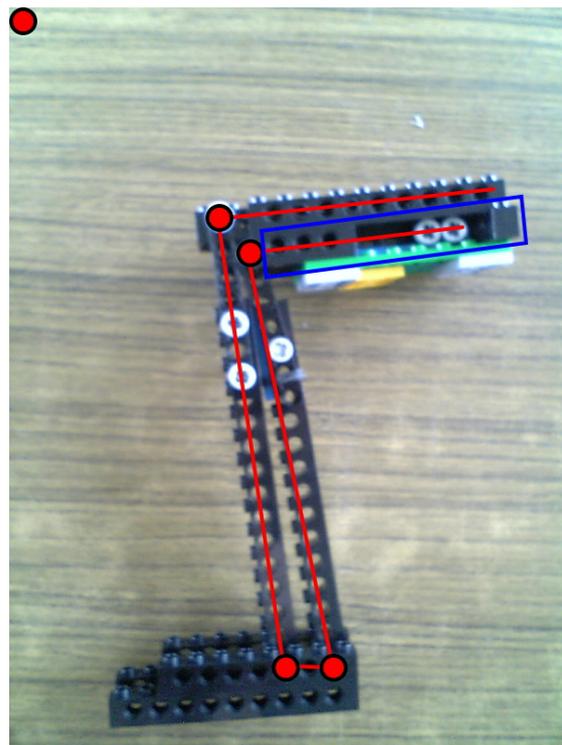


図5 膝を曲げ脚を上げきる

図4では、スライド機構を上を引き上げることによって後ろ側の脚を短くし、それによって膝を曲げている。実際に腿を上げるのは本体側のモーターになる。

図5は、腿が地面と水平になる。スライドが一番奥まで入る。その時、膝上と膝裏に無理が生じないため、しっかりと膝を曲げることができる。実際の人間の足に近い。

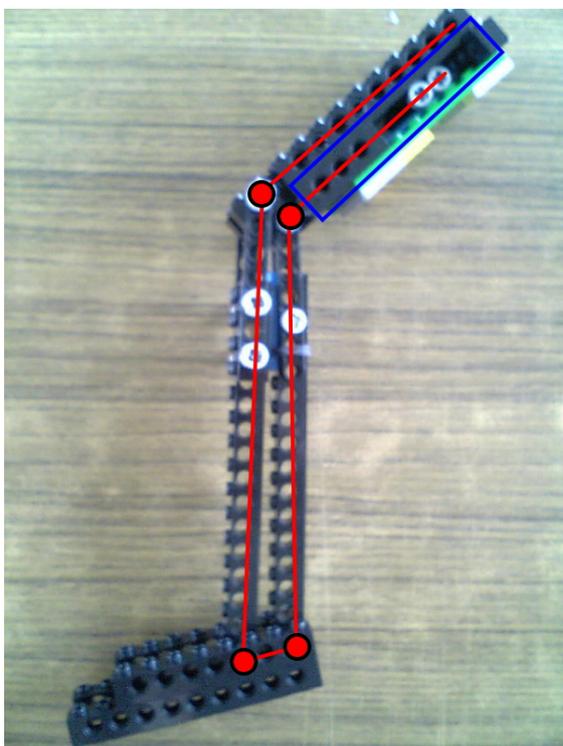


図4 脚を上げ始める



図6 脚を前に出す

図6は、スライドを前に出すと後ろ側の脚が伸びて膝から下が前にでる。リンク機構で足は水平に近いまま。本来ならば腿の表側が縮み足を持ち上げる。



図7 足を地面につける

本体とつなげた場合、重心の関係で体が前に倒れ、前に出していた足が地面につく。



図8 重心を前に持ってくる

図9は、足をついたら重心を前に持ってきて次の一步に繋げる。この時、両足のスライドを下へ下げる。

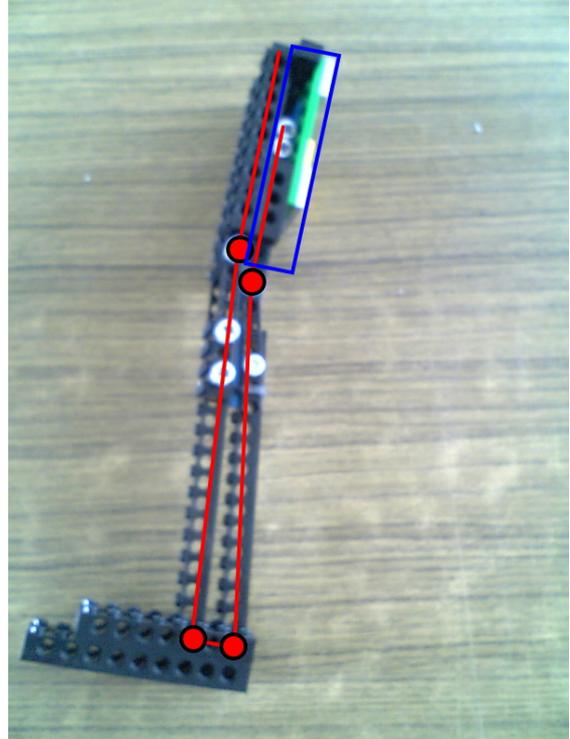


図9 直立に戻る

そのままスライドを下げて直立、最初の状態まで戻す。この時、反対の足は腿を上げ始める。

この機構では自動で行動させた場合にきちんと動作しなかったり、またしっかりと直立できなったりすると思われる。そこで、下記で実際の二足歩行を紹介する。

5. 実際の二足歩行ロボット

ロボット先進国日本では、ASIMOを始めとする高性能ロボットが次々と開発されている。それらの多くは二足歩行するように設計されている。その二足歩行にもいくつか方法がある。

5.1. 二足歩行ロボットの歴史

二足歩行ロボットが研究対象になったのは1970年代からで、当初は倒立振り子の延長上の技術として考えられていた。人間の歩行は4重倒立振り子として考えることができるので、倒立振り子モデルの研究によって二足歩行が可能になると考えられてい

た。振り子の可動範囲を制限することによって理論的には二足歩行ができると思われていた。

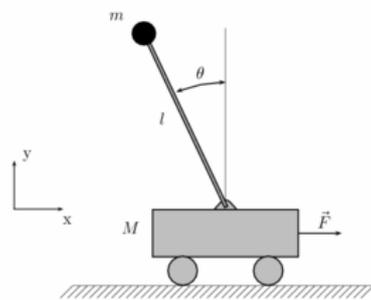


図 10 倒立振り子

しかし、そのためには適宜その値を計算しなければならず、当時の技術では実現は不可能だった。代わりに ZMP (Zero-Moment Point) と呼ばれる歩行規範が登場した。重心と床からの反発力の作用点の軌道から歩行制御をしているらしい。大学に進学した時に勉強したい。

ZMP の登場により、厳密な計算が可能になったが、まだ足りないものが存在した。上半身である。それまでのロボットは、腰から下、下半身のみのものであり、そのために片足を上げただけでも、質量の半分が移動するため、重心が非常に不安定だった。早稲田大学のグループの研究により、上半身の重要性が認識されたため、現在ではほとんどのロボットに上半身、最終的には腕や頭がついている(アクチュエーターの性能向上により、現代では上半身がなくても歩行は実現できる)。

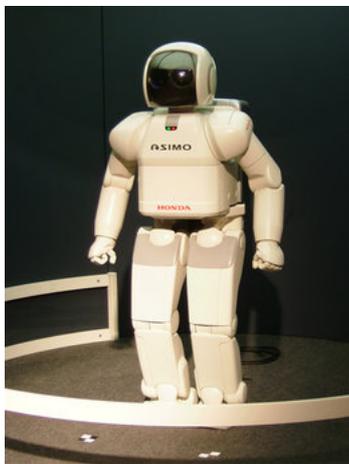


図 11 ASIMO

現在では、ASIMO に一応の技術の成熟を見て、二足歩行ロボットの研究はヒューマノイドとしての統合システムの研究に移行しつつある。

5.2. 歩行とは何か

歩行とは脚の運動による移動方法の 1 種である。体重のかかるほうの脚を軸脚、振り上げている方の脚を遊脚と言う。二足歩行は 2 本の脚を交互に軸足にして重心を任意の方向に移動する移動方法である。

歩行の形態には静歩行と動歩行がある。静歩行とは重心の路面への投影点が左右いずれかの足の裏に位置するような歩行である。静的に安定(重心が常に軸足の上にあるため)なのでどこで停止しても転倒することが無いが、床面が常に平面である等環境に制約が多い。一方、動歩行は重心の路面への投影点が足の裏から外れる、通常人間が行うのに近い歩行である。運動している限りは安定だが、運動量を打ち消してから歩行動作を停止しないと転倒してしまう。制御は難しいが、でこぼこ道など条件の悪い環境にも対応できる。

二足歩行ロボットの研究対象になっているのは主に動歩行で、今回の LEGO の機構も動的歩行のための機構である。

5.3. 二足歩行に潜む数学

二足歩行には、実は数学が潜んでいる。普段、私たちが歩くとき、両足が同時についている時間はごくわずかである。しかし、常にどちらかの足はついていて、この歩行をトロットという。ほとんどのロボットはこのトロット歩行を基準に作られている。このトロット歩行をモデルに用いると、歩行運動を軸足の接地点を中心とした円運動と捉えることができる。このとき、円運動とすれば遠心力が発生するはずである。このときの遠心力 F は下の式で表される。 v は重心の移動速度 (= 歩行速度)、 r は重心位置の高さ、 m は質量である。

$$F = \frac{mv^2}{r}, \quad v = \sqrt{gr}$$

人間は秒速 v で左向きに歩いている。

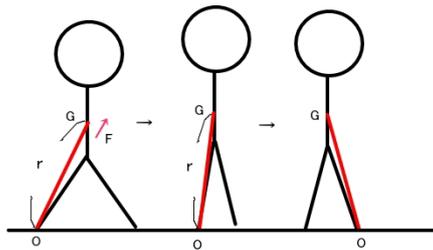


図 12

このとき、OG は円運動をしている。図で表すと、GG'間で重心 G は速度 v で移動する。

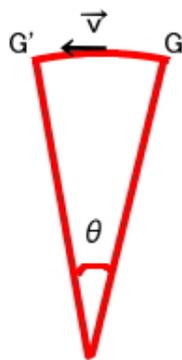


図 13

この式によって求められた遠心力が、体重よりも大きくなった時、足が地面から離れ歩行から走行へ変わる。

人間の重心位置の高さを 1.2 m とすると歩行の限界速度は 12.3 km/h となる。競歩の世界記録は 13.6 km/h (50km)。腰の捻りや足裏のストロークなどが加わるため理論上の数値よりは大きくなる。短距離では 16 km/h ほどまで速度があがるが、これは腰を落として回転運動にならないように強引に体を水平に動かしているためで、疲労の度合いが激しい。

これがロボットになると、走行にいたらなくても、歩行速度が上昇すると軸足にかかる摩擦力が小さくなり、転倒する可能性が上昇する。

6. おわりに

冒頭にも書いたように、テーマが最初から最後まで一定しなかった。そのために、テーマ決めに非常に苦労した。しかし、調べてるうちに、二足歩行にも数式が見えてきて面白かった。大学ではできればロボット工学を勉強したいと思っているので、その助けに少しでもなれば良いと思った。

おまけ

～二足歩行がガンダムサイズ(全長 18m)になったら～

多くの二足歩行ロボットが SF やアニメに登場する。ほとんどのロボットは、何十 m という大きさだ。実際その大きさになったときに、前述の遠心力などはどうなるのだろうか。

人間のサイズにおいて、左図の G 点の最下点と最高点の差は、30 cm と言われている。人間の身長が 1.8 m とすると、最低でも 10 倍、3 m となる。つまり、1 歩歩くごとに 3 m 揺れるのである。また、その時の遠心力は、本体質量が 40 t であるから、 $40000[\text{kg}] \times v [\text{m/s}]^2 \div 12[\text{m}]$ ($v = 10 \sim 50 \text{m/s}$) = $8000000[\text{N}]$ となり、中にいる人間には耐えられないものになるはずだ。構造材や出力の問題だけでなく、こういった面でもガンダムのような巨大ロボットは空想であることが伺える。と言っても、人間が乗るロボットが実現不可能なわけではないため、工事現場などで二足歩行ロボットを見かけるようになる日もそう遠くはないかもしれない。

参考文献・参考 Web サイト

<<http://kmoddl.library.cornell.edu/index.php>>

[2006, September 30]

<<http://ja.wikipedia.org/wiki/>>

[2007, August 05]