



第9回 科学の甲子園 全国大会

実技競技③

「積んで埼玉」

オートマチック台車によるブロック運び

解説



埼玉県のマスコット「コバトン」

【解説】

科学技術の分野では、様々な条件下で、最大の成果を得る最適な解を目指すことが必要になることがあります。

例えば旅客機の飛行経路の決定に際して、飛行時間を短くしたい、燃料消費量を抑えたいという条件があります。高空を飛行すれば空気抵抗を減らすことができます。しかし高空を飛行し空気が希薄になるとジェットエンジンの燃焼が難しくなります。上昇角度を大きくとれば、省燃料飛行が行える高度まで速く到達



最適化された経路を飛ぶ飛行機

できます。しかし上昇のために余計に燃料を消費します。上空の風力風向分布、乗客と荷物による機体重量、安全確保のための経路の制約などの検討も必要になります。

また別の例として、発電所から我々の家庭までの送電網について考えてみましょう。送電ロスの主要な原因は送電線の電気抵抗による熱の発生です。「物理基礎」で習うように、電気抵抗は送電線の断面積に反比例して小さくなりますが、断面積を大きくすると送電線は重くなりコストがかかります。また高い交流電圧で送電すると、流れる電流を低く抑えられるので送電ロスを減らすことができますが、絶縁が難しくなります。

多くの場合、条件 A を追求すると条件 B を満たさなくなり、条件 B を追求すると条件 A を満たさなくなるというトレードオフの関係が生じます。その中で工夫を重ねて最適な解を見出すことが必要になります。解を見つけ出すにあたっては、最初はどのような物理法則や科学などの成果を使うのかわからないこともあります。実験や観察の中から法則を見つけ出さなければならないこともあります。

今年度の課題では、限られた時間内で搭載物(ブロック)を崩さずに、できるだけ多く運ぶのに最適な運搬用台車(競技中ではオート台車)とその制御回路を製作することが求められていました。

定められた電池およびモーターを使ったオート台車は、トグルスイッチで発進し、リミットスイッチとストライカーの機構で限られた制動距離で停止する必要があります。

また、発進時および停止時に搭載物(多段に積み込んだブロック)に生ずる慣性力と戦って、ブロックが倒れないようにする必要があります。

図1はブロックにはたらく重力と慣性力を表しています。慣性力が大きくなると、重心にはたらく合成力の方向が、倒れるときの回転中心の外側に出てしまい、ブロックが倒れることを示しています。ブロックを倒さないようにするには、重心の位置を低くすればよいのですが、それだとブロックを多く運べません。そうすると、どのようにして慣性力を小さく抑えるか、すなわちブロックの載っている面の加速度をどのようにして小さくするかを考える必要があります。

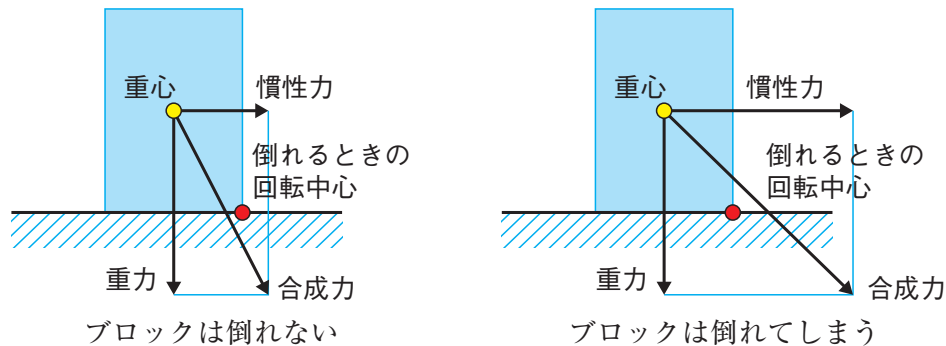


図1 ブロックにかかる慣性力と、ブロックの倒れやすさ

さらに定められた時間内にできるだけ多くのブロックを倒さずにスタートエリアからゴールエリアに運搬する作戦が必要になります。

まずは、次のような基本的な作戦が考えられます。

- ① オート台車が高速走行できれば、運搬回数を増やせます。最大加速度も大きくなるため、一度に多くのブロックを運ぶのは難しくなります。しかし運搬回数を増やすことができるため運搬ブロック数を多くすることができるはずです。
- ② オート台車の走行速度を抑えれば、最大加速度も緩和され、運搬回数は減りますが、一度に運べるブロック数を増やすことができるはずです。
- ③ オート台車の走行速度を規定時間内に往路を1回だけ走行できる程度まで遅くすれば、最大加速度もかなり低くでき、一度に多くのブロックを運搬できるはずです。
- ④ これらに加え、最大加速度を緩和する免震機構の採用はプラスの効果になるはずです。どの作戦が規定時間内にいちばん多くのブロックを運べるのでしょうか。直感を信じる？すべてを実験でやってみる？ 実験で法則を導き出し、計算してみる？

ここで使用する DC ブラシモーターとギヤボックスに関する法則や性質を利用することを考えましょう。まずは自分で実験して実証的に調べるのが大事です。事前公開資料、書籍あるいはインターネットなどを利用して法則や性質を調べることもできます。

ギヤボックス単体の性質は、同じ電源、同じ DC モーターを使ったときには、次のようになっていることがわかんと思います。

- ① ギヤ比を大きくすると、出力軸の角速度(回転の速さ)は遅くなりますが、発生トルクは大きくなります。そのため、オート台車では、最大速度(加速終了後の一定速度)が遅くなります。
- ② ギヤ比を小さくすると、出力軸の角速度(回転の速さ)は速くなりますが、発生トルクは小さくなります。そのため、オート台車では、最大速度は速くなりますが、最大速度に到達するまでの時間が長くなります。

DC モーターの使い方ではいくつかの工夫があります。それらの性質を検討してみます。

(A) 発進時

- ① 図2においてDC モーターに電池をつなぐと、その瞬間に最大加速度を生じます。その後速度が増すと加速度は小さくなり、ついには最大速度に到達し、そのまま最大速度で進行します。
- ② 図3のようにDC モーターと直列に小さな出力緩和抵抗(10Ω程度)を挿入すると、発進時の最大加速度を低減できます。また定常走行時の速度も遅くなります。この効果はギヤ比の選択の効果に加えたものになります。大きすぎる抵抗を使うと駆動力が不足してオート台車は動かなくなります。

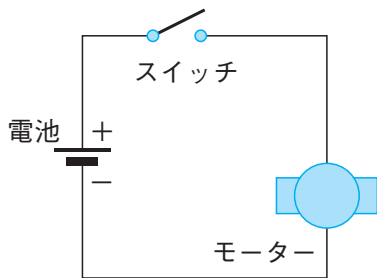


図2 モーター+スイッチ+電池

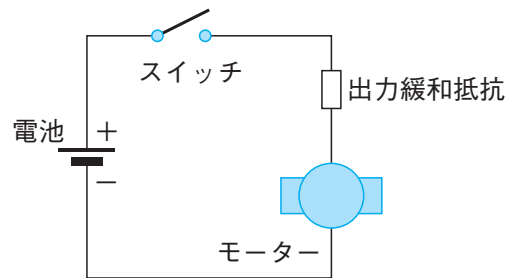


図3 出力緩和抵抗

(B) 停止動作時

オート台車を走行中に停止させるには、スイッチによって、電池からモーターへの電流供給を絶つこととなります。これには次のような3つの方法があります。

- ① 図2の回路の場合、スイッチ OFF と同時にモーターの端子間を開放にすると、モーターは停止動作に何も影響を与えず、オート台車は止めようとする転がり摩擦抵抗力によって等加速度運動を行い、自然停止します。
- ② 図4のように電池を切り離れた後にモーターの端子間を導線によって短絡(ショート)すると、モーターは発電機となり見かけの電池となります。発生した電流は、モーターの内部抵抗によって熱として散逸されるため、自然停止のときよりも短い距離で停止できるようになります。この効果はショートブレーキ効果と呼ばれています。モーター軸の角速度が大きいほどこの効果が強くなるため、採用されているギヤボックスのギヤ比が大きいほど大きくなります。逆に小さなギヤ比の場合にはこの効果は小さくなります。
- ③ 図5のように電池を切り離れた後にモーターの端子間を小さな抵抗(10Ω程度)で接続する(電源は遮断されている)と、導線接続のときと同様にモーターは発電機となります。発生した電流は、モーターの内部抵抗と外部に付けた抵抗によって熱として散逸されるため、自然停止のときよりも短い距離で停止できるようになります。しかし2つの抵抗によって散逸する熱は図4のときに比べ、それほど大きくないため、ショートブレーキ効果は緩和されてしまいます。この方法を採用すればショートブレーキ効果が大きすぎるときに、適切な状態にコントロールできます。外部抵抗を大きくすればショートブレーキ効果を弱めることができ、小さくすれば強めることができます。これは、ギヤ比の選択による効果に加えた効果になります。

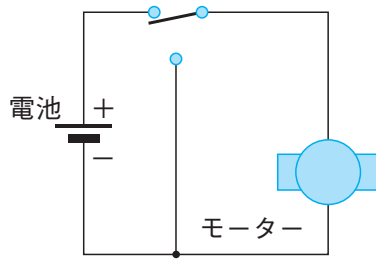


図4 ショートブレーキ

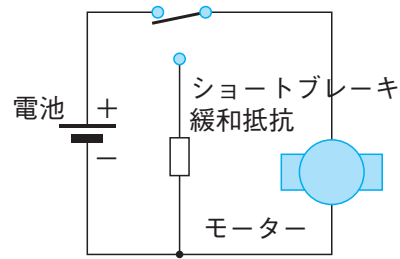


図5 ショートブレーキ緩和抵抗

オート台車発進時あるいは停止動作時にブロックには大きな慣性力が生じます。地震対策用の免震装置のしくみを使って、ブロックに生じる慣性力を低減することができます。電気回路側の対策に、機構上の工夫を行うことでブロックを1つ余計に積むことができるかもしれませんが、図6の機構では、ばね(製作時にはゴムが使われると思います)と質量で作られる振動系の固有振動数を低く(例えば1 Hz 以下)抑えられれば、ブロックに生じる慣性力を抑えられるでしょう。しかし固有振動数を低くすると、自由可動台の振動振幅が大きくなるため、長いオート台車が必要になります。

また図7の機構でも振子の固有振動数を低く抑えられれば、ブロックに生じる慣性力を抑えられるでしょう。振り子型では、自由可動台が移動すると、ブロックが倒れない方向に自由可動台が傾くので有利です。

しかし、どちらの構造でも自由可動台は減衰しながら振動します。振動の最初の振幅が大きくなり、それは固有振動数によるので、固有振動数の選び方が重要になります。また、振り子型の方が顕著ですが、振動がなかなか収まらないといったことも起こるので、速く振動を減衰させる対策も必要になります。

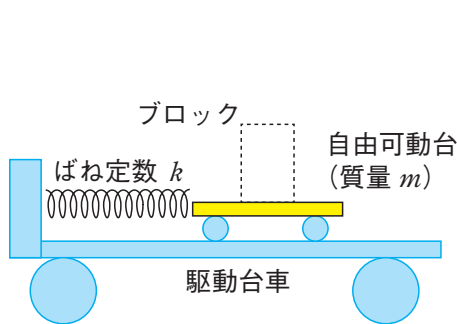


図6 ばねを用いた自由可動台

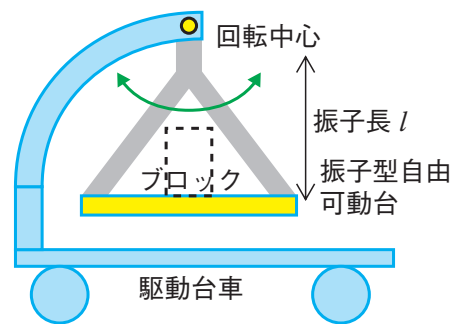


図7 振り子型自由可動台

物理法則を超えるような魔法はありません。物理法則を味方につけて、最適な方法を見つけ出してください。