

電子機器「ハノイの塔」の開発

— 技能五輪競技課題において —

神奈川県立産業技術短期大学校 電子技術科 矢島 康治

1. はじめに

私は、数年前から技能五輪全国大会の電子機器組立て職種の競技委員を務めており、競技の運営や競技課題の作製などを担当しています。第43回やまぐち大会は、平成17年10月28日～31日に山口県維新百年記念公園などで競技が行われました。

本報告では、今年の競技課題の1つとして電子機器「ハノイの塔」を製作したので、その開発過程や動作概要などについて紹介します。

2. ハノイの塔について

2.1 パズル『ハノイの塔』について

『ハノイの塔』という言葉は、みなさんも一度は耳にしたことがあると思います。この夏には、パズル雑誌の創刊号付録としてテレビCMでも登場していました。ハノイの塔は、1883年にフランスのパズル研究者E. Lucasが考えたゲームです。図1に示すように、台の上に3本の棒が固定されており、そのう

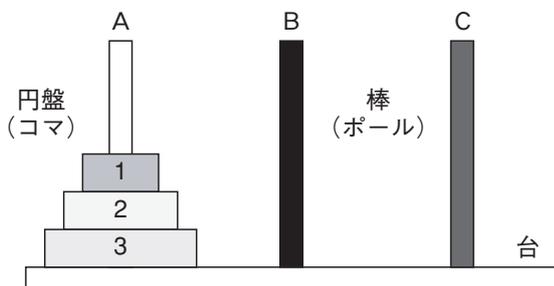


図1 ハノイの塔の構成要素

ちの1本に何枚かの円盤がはまっています。円盤は下へいくほど半径が大きくなっています。このパズルは、3本の棒を利用してすべての円盤を別の棒に移すゲームです。ただし、以下のルールに従って、円盤を移動させなくてはなりません。

- 1回に1枚の円盤しか動かせません。
- 移動の途中で円盤の大きさを逆に積んではいけません。常に大きい方の円盤が下になるように積みなければなりません。
- 棒以外のところに円盤を置いてはいけません。

例えば、一番左の棒Aにはまっている3枚の円盤すべてを棒Cに移すとします。この場合7回の操作で移動できます。円盤が3枚程度であれば、比較的簡単に解けますが、円盤の数が増えるにつれて難しくなります。円盤の枚数を n とし、すべての円盤を棒から棒に移す最小の移動回数 H は、 $H = 2^n - 1$ で求められます。5枚では31回、10枚では1,023回です。なお、コンピュータプログラミングの問題としては、再帰を使う代表的な例として有名です。

2.2 電子機器「ハノイの塔」について

市販されているパズルでは、手を使って円盤を棒から棒へ移します。インターネットにて検索すると、パソコン画面上でシミュレーションできるものもあります。今回製作した電子機器「ハノイの塔」(以下「ハノイの塔」という)では、手で動かす代わりに、機械的に円盤を運びます。図2に機器の外観写真を示します。円盤を動かす操作は、6個の押釦スイッチにて行います。移動元→移動先の棒(以下「ポー



図2 電子機器「ハノイの塔」の外観写真



図3 操作スイッチ

ル」という)の色に対応するボタンを1つ押します。例えば、白色のポールのコマを赤色のポールに移動させたいときは、図3の写真において左から2つ目のボタンを押します。円盤(以下「コマ」という)の移動は、次の手順で行います。

- ① 動かしたいコマのあるポールをリフト下にくるようテーブルを回転させる。
- ② コマをポールから抜き取る。
- ③ 移動先のポールがリフト下までくるようテーブルを回転させる。
- ④ コマをポールに挿入する。

①～④の一連の移動に要する時間は、おおむね30秒かかります。

3. ハノイの塔の開発過程

3.1 競技対象機器として

ハノイの塔の構想が持ち上がったのは、平成17年4月終わりでした。技能五輪全国大会において、電子機器組立て職種の競技は、他の競技職種に比べ「何をやっているのかさっぱりわからない。」とか、「細かい作業ばかりで見栄えがしない。」と常々言われていました。そこで今回のやまぐち大会では、「一般の人が見てわかりやすく、動きのあるモノ」を競技対象にしようと、競技委員の意見がまとまりました。そのうちの1つがハノイの塔であり、もう1つはFM音源LSIと距離センサを用いた簡易テルミンでした。簡易テルミンについては、興味がある方はご連絡ください。

3.2 開発にあたって

実際に開発に着手したのは5月でした。開発にあたっては、以下のポイントを重要視しました。

- 工程数が少なく、大量生産が可能なこと
- バラツキのない同質の製品ができること
- 特別な工具を用いずに組み立てられること
- 低コストでできること

例年の参加選手数+ a として製作台数を50台と設定しました。この機器は競技当日まで非公開なので、競技委員サイドですべて作らなければなりません。したがって、とにかく組立てやすいこと、そのうえで個々の製品にバラツキが出ないことを念頭に、部品選定や組立て方法を検討しました。

3.3 コマを持ち上げる

最初に、コマを持ち上げる部分の検討です。コマを持ち上げる方法としては、“つかむ”、“吸着する”のおおむね2つがあります。ロボットアームなどを構成し“つかむ”ことは、規模的にも予算的にも困難であるので、“吸着する”方法としました。その吸着方法にも、空気式や電気式などありますが、電子回路のみで動作できる電磁石としました。

ところが手ごろな電磁石というものは、あまり市

場に流通していないのです。そこで入手しやすいソレノイドを利用することにしました。ソレノイドは、電流のON/OFFで可動鉄芯をスライドさせ、機械的な直線運動を得るためのアクチュエータです。ここでは鉄芯を通じて通過する磁力線に注目し、可動鉄芯を接着剤で固定し、鉄芯の端面を磁石として使用します。

3.4 コマをポールから抜き取る

コマをポールから抜き取るため、コマを吸着したソレノイドを昇降させます。この昇降機能の実現は、機械設計の経験がない私にとっては大きな壁でした。当短大の生産技術科の先生方にアドバイスをいただくことにしました。検討の結果、昇降装置として、

- ボールねじを用いる
- ギアとラックを使用する
- プーリーとベルトを用いる
- ひもで巻き上げる

などがあがりました。ボールねじは精度良く確実に動作させることができますが、それだけで十分高価な部品です。50セットで100万円近くになってしまいます。ギアとラックを用いた機構も設計が難しそうです。それ以上に、メカニカルな部分を探り入れれば入れるほど、規模が大きくなり、重くなってしまいます。メカトロニクス競技ならばよいでしょうが、電子機器組立て競技には大袈裟すぎます。まずは、持ち上げることを優先して、ひもで巻き上げる方式で、図4に示すプロトタイプを作製しました。

3.5 プロトタイプの製作

プロトタイプの素材には、技術家庭の教材としてよく利用されているロボコンパーツ（山崎教育システム）を用いました。ターンテーブルにはCDを使用し、ステッピングモータの軸につけたプーリーに両面テープで貼り付けています。ポールは基板用のスペーサとしました。ソレノイドを配備したアームの昇降は、アームに結んだ麻ひもをDCモータにて巻き上げて行います。DCモータには遊星ギアを装着しているため、モータの電圧を切ってもアームは落ちません。

図5（a）がコマを持ち上げている様子です。コマはスチレンボードを加工し、ソレノイドの鉄芯の間隔に合わせて平ワッシャを4枚貼り付けてあります。コマが軽いので難なく吸着することができます。アームの上昇も問題なく、ポールからコマを抜き取ることができました。

ところが、図5（b）のようにソレノイドの重さでアームが前傾し、支柱に設けた溝に当たっているため、モータを逆回転しひもを緩めても、スムーズに下降しません。また、ソレノイドの高さが微妙に違うため、コマの吸着が不安定です。プロトタイプ作製の経験により、以下のようなポイントが抽出できました。

- アームのスムーズな昇降
- 2つのソレノイドの高さの不釣り合い
- コマの重さとソレノイドの吸着力
- コマに貼る磁性材の選定（材料、大きさ）

3.6 製品化に向けた部品の選定

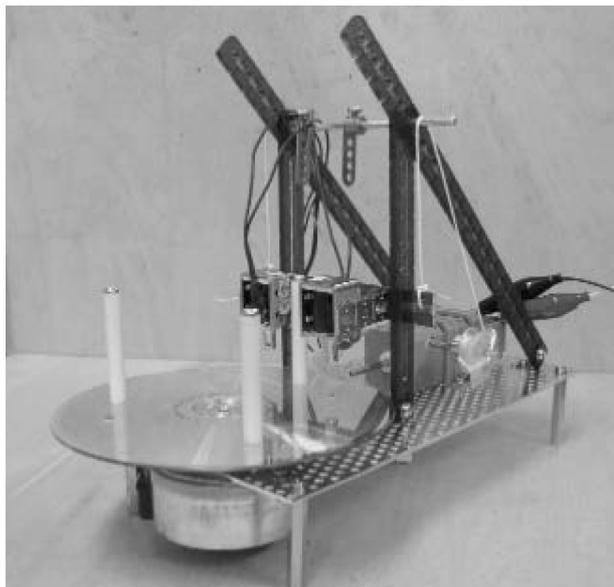
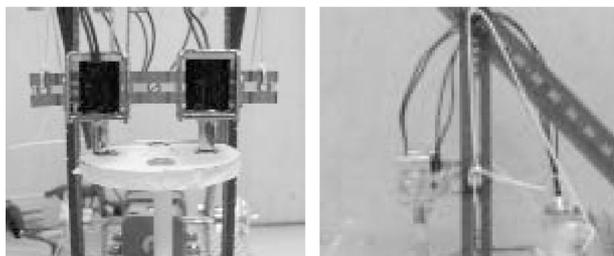


図4 ハノイの塔のプロトタイプ



(a) コマの持ち上げ (b) アームのガイド

図5 各部の様子

プロトタイプにて一連の動作確認ができたので、製品の実現に向けて本格的に部品選定に入りました。

(1) コマ

市販されている玩具のほとんどが木製です。耐久性と価格を考慮すると木製が妥当なのですが、ここではできるだけ軽い素材を探します。スチレンボードも加工しやすいのですが、耐久性の面で劣ります。

一方、コマに貼り付ける鉄片は、水平面での回転やずれが生じて吸着できるよう、径の大きな平ワッシャとします。これも軽い強磁性材にする必要があります。ホームセンターなどで市販されている平ワッシャは、径の大きさに比例して厚くなり重くなります。巻ばねに使用するリボン鋼のような金属から加工することにしました。

図6にコマの設計図を示します。子どもでも容易に持てるよう、コマの大きさは直径40mmから5mm刻みで60mmまでの5種類とし、厚みを10mm程度としました。コマの中心には直径8mmの穴を設け、裏面にはボールに入りやすくするためのテーパを設けています。それに貼り付ける平ワッシャは、内径15mm-外径40mm程度の大きさとししました。

設計図をもとに業者に依頼したところ、コマは発砲ポリエチレンシート、平ワッシャは $t=0.8\text{mm}$ の鉄板で製作することができました。コマの重さは径40mmのもので0.7g、径60mmのもので1.7g、ワッシャは5.9gです。ただし、5色に色分けしたコマは1セットで相当な価格になってしまいました。

(2) ソレノイド

コマを軽くしたい理由はソレノイドにあります。アームを軽くし簡易な昇降機構とするには、小さいソレノイドが最適です。しかし小さいものは磁力も弱くなります。ここでは0.1kgfの吸引力がある+12V駆動のソレノイド (BLPComponentsのSeries58, RSコンポーネンツにて販売, 1個¥670) を使用することにしました。重量は1個18gです。このソレノイドの背面にはタップ穴が設けてあるので、図7のように同じ高さで取り付けられます。

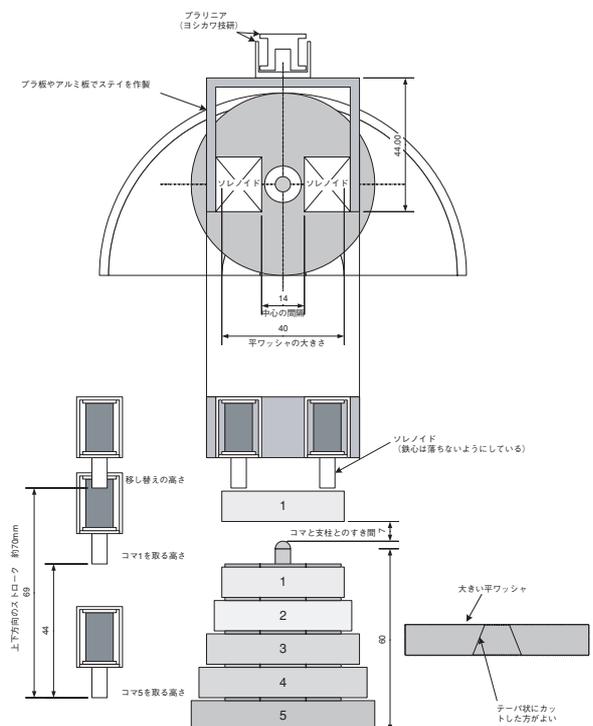


図6 コマの設計図

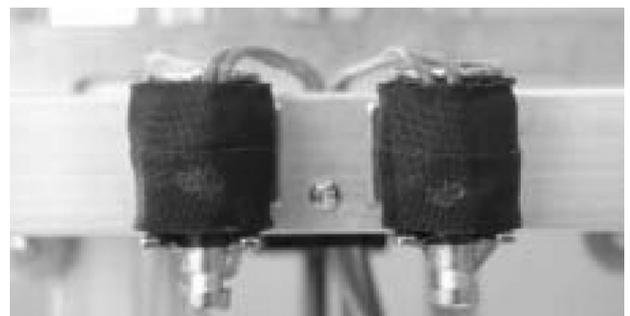


図7 アームに取り付けたソレノイド

(3) リフト (昇降装置)

簡単な機構で確実に昇降する装置は、なかなか決められませんでした。スムーズな移動のためにレールとローラーも有したプラリニア (ヨシカワ技研) を用いる予定でしたが、昇降方法がネックになりました。最終的には、安く、すでに動作確認できているタミヤ模型のフォークリフトプラモデルのリフト部をそのまま活用することにしました。

この昇降機構は、簡易なボールねじです。DCモータにはめたウォームギアでネジシャフトを回転させ、シャフトに嵌っているナットを上下させます。ナットはフォーク部に埋め込まれており、それ自身が昇降します。印加電圧の方向でDCモータは正転反転するので、リフトも上昇下降します。図8はフォーク

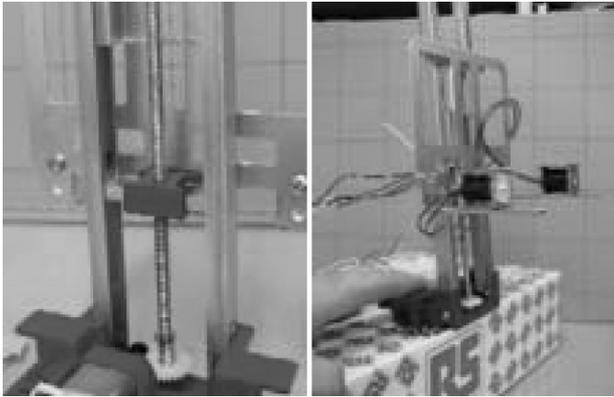


図8 フォークリフトのリフト部

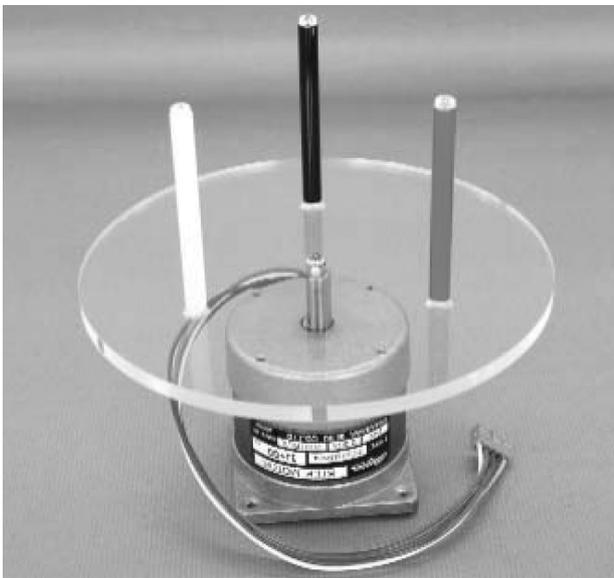


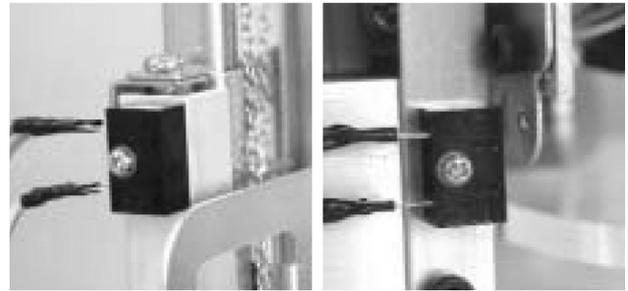
図9 ターンテーブルを取り付けた様子

リフトの写真です。昇降能力は100gとありますが、150gまでは可能でした。前述のソレノイド2個は楽々持ち上げることができます。

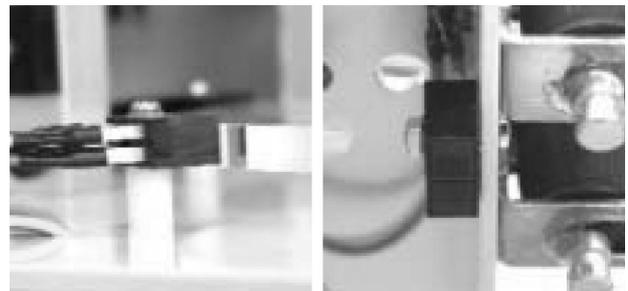
(4) ターンテーブル

試作ではターンテーブル代わりにCDを用いていましたが、モータの軸に取り付けるには、別に軸受けが必要です。また、 120° の間隔でポールを配置するための穴を開けなければなりません。手間と費用を考え、ここではミスミのメカニカル部品カタログから、直径140mmの亚克力円盤に3穴の追加工を行い、購入しました。

ターンテーブルを載せるステッピングモータは、価格面で多摩川精機の2相ステッピングモータ（秋月電子通商にて300円）にしました。このモータの軸



(a) リフト上限検出用 (b) リフト下限検出用



(c) テーブル位置検出用 (d) コマ検出用

図10 位置検出用フォトセンサ

端面のねじ穴にターンテーブルを直接留めます。図9にその写真を示します。ポールは長さ60mmの基板用スペーサを利用し、3本のうち2本は赤色と黒色に着色しました。なお、ポールの上端の角部分にコマが引っ掛からないよう、プラスチックのなべ小ねじを取り付けます。

3.7 位置検出センサ

リフトの上限下限検出、ターンテーブルの位置検出、コマ検出のために、5つのフォト・マイクロセンサ（オムロン、形EE-SF5）を用いています。このセンサは、反射型の光センサで、約5mm前方の物体を無接触で検出します。透明亚克力樹脂のターンテーブルには、反射光を得るため幅4mmの銀色の反射テープを貼り付けています。

3.8 電子回路

マイコンには、PIC16F877(Microchip社)を用いています。6個の押釦スイッチを読みとり、ステッピングモータ、ソレノイド、DCモータをシーケンシャルに制御し、一連の動作を行います。5つのフォトセンサの情報は、それぞれコンパレータにより2値化されマイコンに入力されます。入出力の状態は

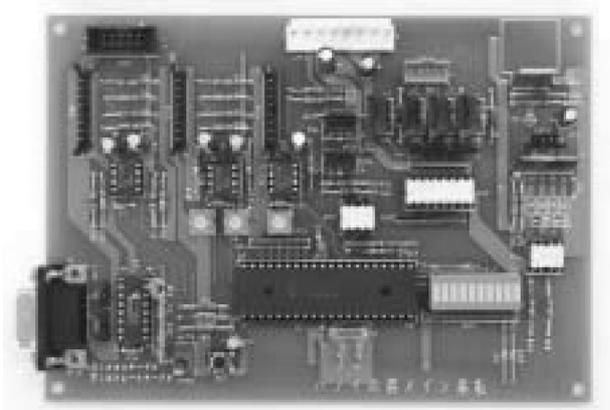


図11 メイン基板

インジケータ用のLEDに表示されます。出力段にはフォトカプラを入れ、アクチュエータの電源系と絶縁しています。PICのソースファイルはC言語で記述しています。図11に製作したメイン基板を示します。

4. 全国大会の競技課題として

4.1 組立作業

できるだけ簡単に組立てられるよう開発しましたが、その作業は膨大です。特にやっかいなのがハーネス類です。長さやコネクタの違うハーネスを8種類作らなければなりません。端子の圧着だけで約2,000個あります。組立てにおいても、1つ取り付ける順番を間違えると、一度ばらさないといけないなど、手間も時間もかかります。効率のよい作業を目指すため、図12に示す作業手順書を作成しました。

実際の組立て作業は、事前に細かい準備をしていたものの、現地にて競技委員および補佐員14名で丸2日、調整に丸1日かかりました。また、コスト的には1台約40,000円となり、決して安いおもちゃではありません。

4.2 競技において

製作したハノイの塔は、10月29日の午前中の競技の中で、修理競技のターゲットとして使用しました。修理競技の課題としては、「どれも同じように壊れていること」が条件ですが、故障箇所ではないもののリフト昇降のスピードにバラツキがでるなど、多少問題の残るものとなってしまいました。競技の様子

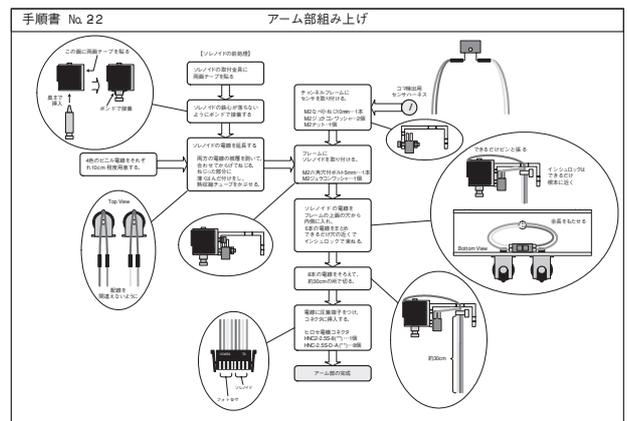


図12 作業手順書



図13 大会での修理競技の様子

を図13に示します。

競技会場にて、ハノイの塔（動作する完成品）を展示したところ、見学に来られた多くの方が足を止めて、興味深く見ていました。一般の方々に「電子機器組立て競技とはどんな競技なのか？ どんなスキルが必要なのか？」をわかってもらえたなら幸いです。

5. おわりに

製作したハノイの塔は、これで完了ではありません。シリアル通信機能を有しているので、アプリケーションを開発すればPC上で操作することが可能になります。また、センサなどを新たに追加して、完全自動化運転を目指すなど、発展の可能性を秘めています。

製作にあたり、多くの方々から有益なご助言をいただきました。みなさまのご協力を感謝致します。ありがとうございました。