



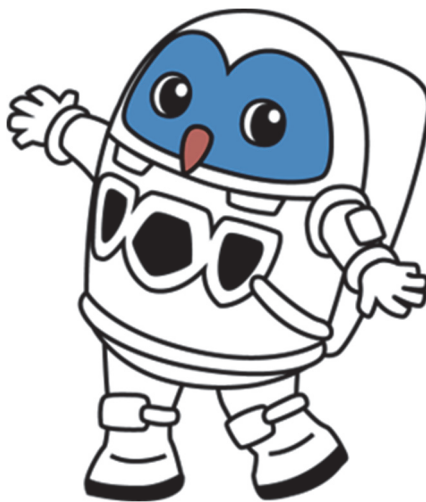
第12回
科学の甲子園 全国大会

実技競技③

「おかえりフックン船長」

マイコン制御によるサンプルリターンカート

解説



つくば市のキャラクター「フックン船長」

1. サンプルリターンカート製作課題について

科学の甲子園全国大会 実技競技③（総合）では、人為的ではない身の回りの現象について科学的知識をもとに分析して、それに対する最適解・最善解を科学的手法によって求めることが要求されてきました。

人類の科学的知識は、自然現象などに対して綿密な観測・観察を行い、仮説を設けてそれを実証し、また再現されることを確認して蓄積されてきました。この手順は科学的方法として認知されています。先入観にとらわれない科学的方法は、人類の科学的知識の累積を発展させています。

今年の課題では、人為的に作られた機器の動作を先入観にとらわれずよく観察し、科学的、論理的な手法を用いて、ミッションを完遂するためのマイクロコンピュータ制御の最適・最善なカートを製作します。

2. サンプルリターンカート製作課題の取り組み方について

サンプルリターンを実現するという課題に対しては、どこから手を付けてどのように開発を進め、どのような原理で動作するものを製作するのかなど、手順が不明なままの開発になると思います。

しかし、達成すべきミッションは明確で、使える部品は限られています。最初から、明確な戦略を描くことはできないので、次のような手順で進めていくことになるでしょう。

- (1) プログラミングの仕方、開発環境の癖などを、サンプルプログラムを試しながら習得します。
- (2) 各種センサー★¹のサンプルプログラムを試しながら、センサーの使い方を習得します。
- (3) 各種アクチュエーター★²のサンプルプログラムを試しながら、アクチュエーターの使い方を習得します。
- (4) センサーやアクチュエーターの性能を見極めます（評価します）。
- (5) センサーやアクチュエーターの性能を考慮しながら、与えられたコースでミッションを完遂するため、カートの構造を決めます。
- (6) 採用したカート構造において、ミッション完遂のために動作のチューニングを行います。
- (7) 必要なら、カートの構造を見直し、(6)に戻ります。

★1 センサー：距離や加速度，磁気を測定します。

★2 アクチュエーター：DC モーター，サーボモーターなど動作を与えるものです。

(1)(2)(3)では、注意深いプログラミングや配線が必要です。間違えると、思い通りの動作が得られないことがあります、その後(4)で誤った評価を与えることがあります。特に配線を間違えると、マイクロコンピュータなどを壊すこともあります。(4)では、動作を注意深く観察したうえでの適切な評価が必要です。センサーなどに誤った評価を与えると、その後の戦略を誤ることになります。製作時間が限られている中で、(7)は難しいですが、良い結果につながることもあるかもしれません。方針転換の決断には、論理的な思考、チームでの議論、勇気が必要です。

3. センサーの性能評価

今回の課題で使用対象になるセンサーは、姿勢測定のための加速度センサー、方向角測定のための磁気センサー、距離測定のための超音波センサーになります。他にも音量センサー・明るさセンサーも使える状態ですが、今回の課題では使わないでしょう。micro:bit での連続測定の場合はどのセンサーでも 20 msec (ミリ秒) の間隔が必要です (これを守らないと正しい測定値が得られません)。

3.1 加速度センサー (micro:bit 内蔵)

水平向きでカートに取り付けた micro:bit の姿勢測定のためには、x 軸と y 軸方向の加速度センサーを用います。測定値は微小値なので、簡単に 0 点調整ができます。x 軸と y 軸方向の加速度センサー測定値からカートの pitch 角, roll 角, カートと最傾斜方向とのなす角が簡単な幾何学計算で求められます。カート移動中に加速度を測定すると、カートの運動加速度や振動加速度も重なった値を得てしまうので、できるだけ止まった状態での測定が必要になります。振動加速度による加速度測定値のばらつきは、測定値の平均化で緩和することができます。

3.2 磁気センサー (micro:bit 内蔵)

水平向きでカートに取り付けた micro:bit での方位角測定のためには、x 軸と y 軸方向の磁気センサーを用い 2 つの測定値から方位角を算出します (測定値の平均算出はこちらのほうが簡単です)。

カート (micro:bit が水平向きで取り付けてある) を固定した状態で、連続して方位角を測定し、その値を連続表示してみます。常に同じ値が得られるわけではなく数度の範囲で値がばらつきます。測定値を平均化するとばらつきは 1 度程度に軽減されます (ばらつきが大きいときは平均化回数を大きくとる必要があります)。

方位磁石は、真北ではなく、磁北 (地磁気における北) を指します。ところが実際には近くにある鉄などの磁性体の影響を受け、真の磁北からずれたローカルな磁北を指します。磁気センサーによる方位測定では、ローカルな磁北からの角度を測定します。micro:bit に鉄製のものを近づけると、測定値が数度変化することを確認できます。また、カートを同じ方向に保ち移動させながら方位角を測定すると、方位角が変化します。これは床下などに鉄の構造材が使われていることが原因です。

磁気センサーによる方位測定を実際に試してみると次のように評価できます。

- ・測定値の平均化を行うと、測定値のばらつきが小さくなる。
- ・真の磁北からの方位角を測定しようとするとき非常に大きな誤差があり、その誤差は測定場所に依存する。→正確さ (確度) は低い。
- ・カートを同じ場所で同じ方向に向けて方位角を測定すると、何回測定しても、また時間を隔てて測定しても常に同じ値 (ばらつきは 1 度程度) が測定される。→精密さ (精度) は高い。測定値再現性がある。
- ・測定場所が 10 cm 程度でも異なれば、ローカル磁北の方向は違っている可能性が高い。

3.3 超音波センサー (micro:bit に外付けして利用)

超音波センサーの距離測定は音速に依存します。音速は温度により変化しますが、20℃付近では 5 度温度が変化すると音速が 0.9% 変化し、測定値も 0.9% 変化します。わずかですが

想定しておく必要があります。

以下は試してみてもわかったことです。

- ・超音波センサーで壁面まで連続測定すると、0.5 cm から 1 cm 程度の誤差で 2 m 程度の距離まで測定できる。
- ・超音波は、送波器から円錐状に幅広く広がり、また受波器も広い方向からの反射波を受け取るため、センサー正面方向から 45 度ほど離れている方向であっても、目的とする正面壁より近くに反射体があると、壁面までではなく反射体までの距離を測定してしまう。
- ・正面に置いた直径 10 cm の円柱に対しても距離測定ができる。また、円柱の中心方向から 45 度程度離れた方向に超音波センサーを向けても、距離測定ができる。この性質を使うと、超音波センサーに首振り運動をさせ左右の検出境界角度が判れば、対象物の方向を推定することができる（対象物が左右に膨らんでいるように感知される）。
- ・時折、測定値に異常値（想定からかけ離れた値）を含むことがある。

4. アクチュエーターの性能評価

アクチュエーターとしては、模型用 DC ブラシモーター+減速ギアボックス、模型用サーボモーターを使用します。micro:bit で駆動して様子を観察することが必要です。

4.1 DC ブラシモーターと減速ギアボックス

2 つの DC ブラシモーターに同じ指令値を与えても、同じ駆動力や回転速度にはならないことにすぐに気づくと思います。変速ギアの組み立て方でも回転抵抗の大小が生じます（組み立て中はねじを軽く締め、出来上がってから、軸が軽く回転するのを確かめながらすべてのねじを徐々にしっかり締めるという手順が大事です。これは可動機構をもつ機械を組み立てるときの鉄則です）。

実際に動かしてみると次のようなことに気づくでしょう。

- ・指令値と回転速度は比例しないこと、停止状態からの小さな指令値での起動は困難である。
- ・2 つのモーターへの指令値に差をつけると、カートの直進走行性能が改善される。
- ・2 つのモーターを一定時間駆動して止めると、常にほぼ一定距離進む。

4.2 サーボモーター

指令値にほぼ比例した角度まで軸を回転して、その角度を保持してくれます。しかし、大きなトルクは出せないため、回転抵抗が大きいときには、思い通りの角度にならないことがあります。また、適度な回転抵抗がないと、目標角度を中心として振動してしまうことがあります。

5. ミッション完遂戦略とカートの構造

スタート・ゴールエリアから（場合によっては方向転換しながら）登坂し、幅 60 cm の水平面から落ちないようにガイドポールを目指して 2 m ほど進み、小惑星のサンプル採取場所に向かって坂を下っていき、サンプル（赤または銀のクリップ、できれば中央付近の赤）を採取し、来た道順を逆にたどって元のエリアにゴールすることがミッションになっています。しかし、狭いコースから落ちないように走行することは難しく、また目標に向けて進み、目標の手前で

止まるには工夫が必要です。

ここで考えられる戦略は、大きく以下の2つです。

- (1) 超音波センサーでコースの縁を感知しながら落ちないように走行し、特定の条件でサンプル採取およびゴールでの停止を実現します。この戦略では、直進走行性は求められないので、「差動できる2輪+ボールキャスター1個」の3点支持のカートが想定されます。
- (2) 最傾斜方向の測定、地磁気での方位角測定、超音波センサーでの円柱や壁までの方位測定・距離測定を行いながらコースを走行し、サンプル採取も行います（いわば正攻法の戦略です）。この戦略では直線走行と回転の両立が求められるため、「差動できる2輪+ボールキャスター1個」の3点支持のカートになります（ボールキャスターは抵抗になるため1個）。
その他の構造バリエーションには次のようなものが考えられます。
 - ・駆動輪は差動させず、2輪が同じ回転になるようにし、従動2輪をサーボモーターで支持し、自動車と同じステアリングで方向転換を可能として、直線走行性を高める（与えられたサーボモーターではトルク不足かもしれません）。
 - ・「差動駆動できる2輪+従動2輪」で直線走行性を高める。従動2輪のままでは回転ができないため、回転時には「差動駆動できる2輪+横向き1輪」に変形する（直線走行の安定性は大きなメリットです）。

6. センサーの利用方法

スタート時のボーナスポイント獲得（半回転の方向転換）のためには、加速度センサーによる最傾斜方向の確認が必須です。事前に較正方法を確立しておけば、チャレンジ走行の時に使用可能です。

超音波センサーでの対象物までの距離測定も、目的の場所で止まるために必須となります。超音波センサーをカートのできるだけテール（超音波が出される方向に対してカートの後方）側にすれば、目標がガイドポール（円柱）であっても、斜め測定の誤差を小さくできます。また、室温は極端には変化しないので、試走時間内にカートが止まるべき位置での測定値を得ておけば、チャレンジ走行時にその値を使用することができます。

磁気センサーによる方位角測定の評価で、絶対方位角は測定できないが、地点を定めて測定された方位角の値には再現性があるということがわかりました。これは、試走時間に必要な地点での方位角測定値を得ておけば、これに従って所望の方向にカートを回転できるということを意味します。

ガイドポール（円柱）や検知用の壁（矩形板）などの方向を見定めるために、超音波センサーをサーボモーターに載せて首振りスキャンして対象物の左右端を見つけ、その中心方向を推定する方法も考えられます。ただし、スキャン中はカートを停止しなければならず、時間の面では不利になります。

超音波センサーを、カートのサイド方向に伸ばした腕の先端に下向きに取り付け、測距しながらコースの縁を検出する方法も考えられます。ただし、コース縁からどれくらい外に出てしまったか、またはコース縁の内側で縁までどれくらい余裕があるかといった情報が得られないため、カートの高速走行には適さないでしょう。

7. 開発環境の重要性

ここまで、各センサーの動作確認やセンサー測定値（平均値）の観察、アクチュエーターの動作確認の大事さを述べてきました。センサー測定値の観察には、PC コンソールなどでの表示が必要であり、センサーやアクチュエーターへの指示も必要になります。設定値を変えるたびにプログラムを書き替えるのも開発効率を悪くします。PC コンソールと micro:bit の双方向通信を実現し、センサーを動かして測定値の連続表示を指示したり、カートに特定の連発動作を指示したり、開発中の関数の呼び出しを指示したり、設定値の変更を指示したりするコマンドを使って micro:bit を遠隔操作できる環境を構築しておく、開発効率が飛躍的に改善します。

8. まとめ

今回のミッションを完遂するカートを開発するに当たって、自分でセンサーやアクチュエーターを評価し、その評価に基づいてコース攻略の戦略を立てたりカート構造を決定したりすることの重要性を述べました。大会終了後、もう一度振り返って欲しいと思います。

付録2に、今年の課題の実現可能性検証のために製作したカートについて紹介しています。以下の URL からの動画も視聴してください（このカートは1分以内にミッションを完遂しています）。 URL : <https://youtu.be/xSacMttqgXI>

付 録

1. 制御方法

この課題に限らず、一般的な制御方法は、オープンループ制御とフィードバック制御がありますので簡単に紹介します。

1.1 オープンループ制御（時間指定制御）

モーター駆動時間指定のみで所望の距離だけカートを進める、あるいは所望の角度だけカートを回転させる方法です。事前に、駆動時間と動作量の関係を調べて表にしておきます（一次関数などで近似してもよい）。所望の距離や角度を目指した動作のための駆動時間をこの表によって求め、モーターを駆動します。動作に再現性があるので、所望の距離や角度で止めることができます。しかし、電池の電圧が変化したり、コース面の摩擦力などが変化したりすると、停止位置のずれが出てきます。

1.2 フィードバック制御

停止させたい位置（目標位置）とカートの位置との差にもとづいてモーター指令値を作り、モーターを駆動する作業を、誤差が許容範囲に入るまで繰り返して行う制御です。指令値の作り方は直感的で素朴なものから比例計算を使うものまであります。

素朴な方法では、大きな指令値で走行させ、停止すべき場所の手前のある距離になったら指令値を0にして所望の場所でうまく止まるようにします。あらかじめ多くのデータを採取しておけばうまくいくかもしれません。

比例計算を使う方法は次のようにします。

カートが目標位置より手前にいたら、前進のために正の指令値を作り、目標値より先に行き過ぎたら後退のための負の指令値を作ります。指令値の絶対値は目標位置からのカートの距離に比例した値にします（遠くにいるほど大きな絶対値になる。モーター指令値の最大値

を超える場合はその最大値にする)。この比例定数を大きくすると、目標位置に速く到達しますが、目標位置で振動してしまうため、速度が大きくなるほど止めようとする効果を持つ速度フィードバックも採用します。この制御では、走行開始時にはモーター指令値が MAX になり、目標位置に近づくと逆向きのモーター指令値になり、急速なブレーキをかけることになり、動作時間を短縮します。しかもモーター指令値の算出は「(目標位置-カートの位置)×比例定数 1-カートの速度×比例定数 2」でできるため、単純です。また、目標位置がカートの先方にある場合でも後方にある場合でも同じ算出式になります(これ以上の内容については事前配布の DVD「フィードバック制御はじめの一步」を参照してください)。

同様のフィードバック制御の考え方で、目標位置→目標角度、カートの位置→カートの角度のように考えるとカートの回転でも使えます。

2. 検証のために製作したカートの紹介

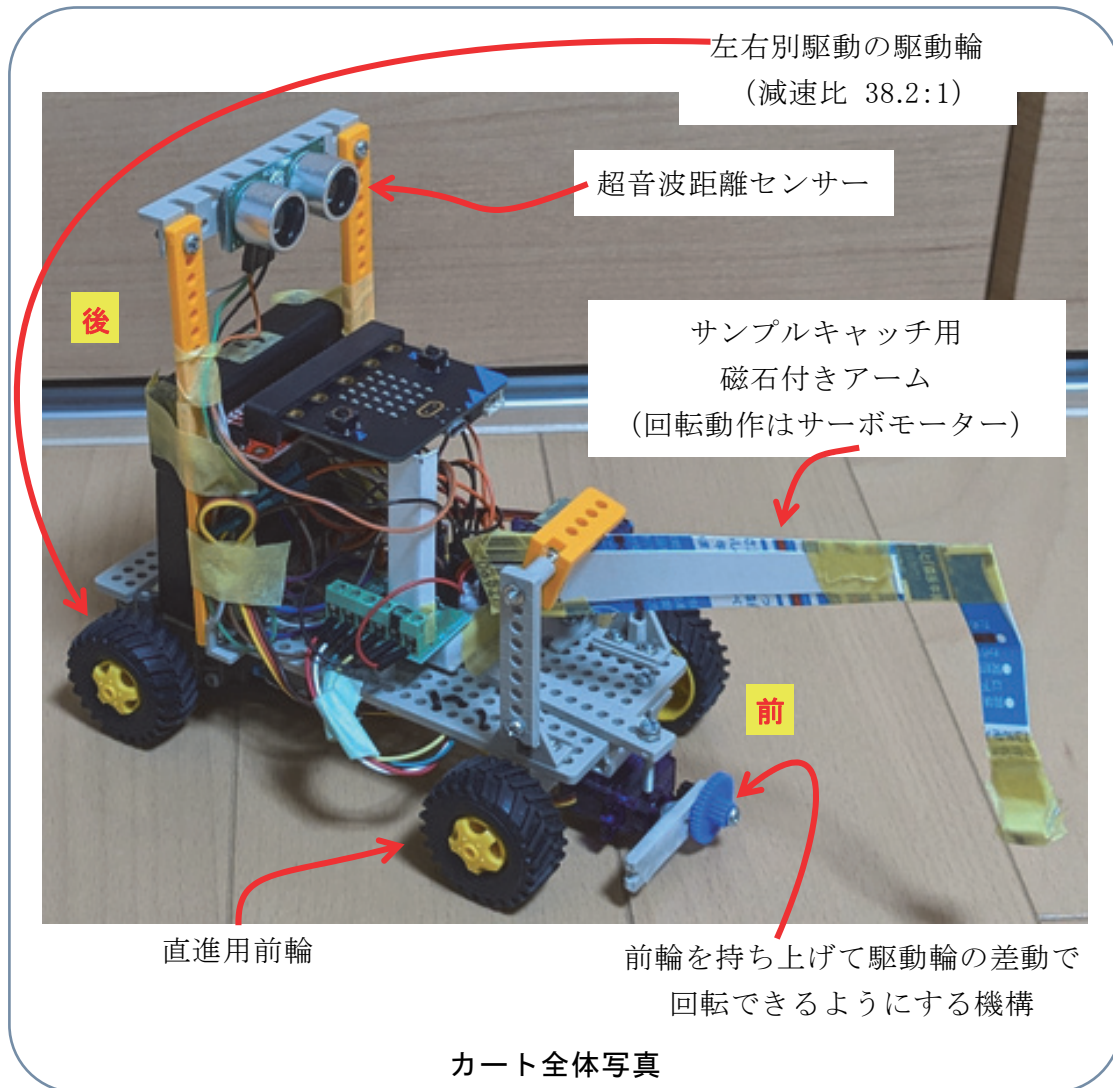
この試作カートは、約 1 分でミッションを完遂しました(最短記録は 50 秒)。

カートは、直線走行時には、「差動駆動できる 2 輪+従動 2 輪」で直線走行性を高め、回転時には「差動駆動できる 2 輪+横向き 1 輪」に変形して回転できるようになっています(横向き車輪は余った歯車を使用しています)。直進走行性能が高いため、途中で方向修正は必要ありません。

カートの動きは次のようになっています。

- (1) スタート・ゴールエリアから CP_2 クリアまでの 180 度回転(方向転換)は、最傾斜方向とカートの方向との差を使って、フィードバック制御で行います。その後は後ろ向きに走行し、超音波センサーで検知用の壁(矩形板)までの距離を測定しながらフィードバック制御で地球側のセンターラインクロスで停止します。止まるべき距離はあらかじめカート搭載の超音波センサーで測定してあります(あらかじめ測定してある距離は全部で 6 か所です)。
- (2) 地球側のセンターラインクロスでは、小惑星側のガイドポールの方角を向くように回転しフィードバック制御で停止します。小惑星側のガイドポールの方角はカート搭載の micro:bit であらかじめ測定してあります。再現性あるローカル方位角測定ができることを利用して回転しています(回転のためあらかじめ測定してあるローカル方位角は全部で 4 か所です)。
- (3) 小惑星側のガイドポールまでの距離を測定しながら、フィードバック制御により小惑星側センターラインクロスで停止します。
- (4) 小惑星側センターラインクロスで、サンプル設置中心方向に向くように、フィードバック制御で回転します。
- (5) 小惑星側の検知用の壁(矩形板)までの距離を測定しながら、フィードバック制御によりサンプル採取位置で停止し、サーボモーター+アーム+磁石でサンプルを採取します。
- (6) 直線走行性の良さを信頼して、そのまま後退し、小惑星側の検知用の壁(矩形板)までの距離を測定しながら、フィードバック制御により小惑星側センターラインクロスで停止します。
- (7) 小惑星側センターラインクロスで、地球側のガイドポールの方角を向くように回転しフィードバック制御で停止します。

- (8) 地球側のガイドポールまでの距離を測定しながら、フィードバック制御により地球側センターラインクロスで停止します。
- (9) 地球側のセンターラインクロスで、ゴール中心方向に向くように、フィードバック制御で回転します。
- (10) 地球側の検知用の壁（矩形板）までの距離を測定しながら、フィードバック制御によりゴールで停止します。



使用されているフィードバック制御は以下のような工夫がされています。

- ・最大傾斜角からの偏差角取得・方位角取得では、目標位値付近で平均化回数を大きくする。
- ・目標位置付近では、位置・速度フィードバック制御から、位置・誤差積分値フィードバック制御に切り替える。

