

パズルキューブ早解きと巻線機のコア技術

Core Technologies of Cube Solving Robot and Coil Winding Machine

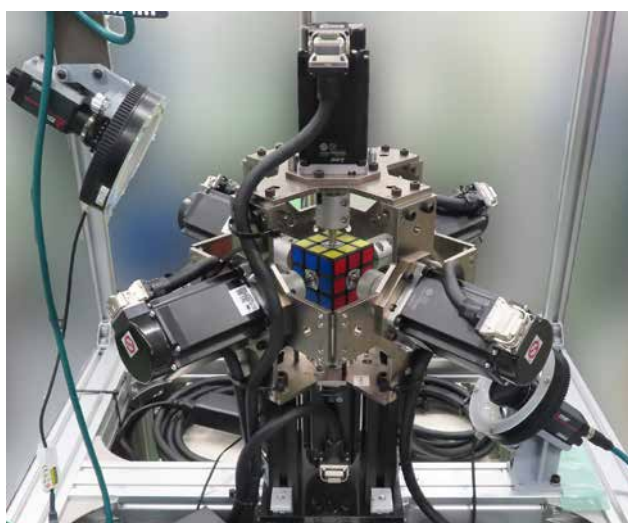
*コンポーネント製造技術センター

要 旨

モーターは、三菱電機が製造供給するパワーエレクトロニクス製品のキーコンポーネントであり、その製造技術の要である巻線技術の進化に力を注いできた。今回、巻線機に必要な高速・高精度位置決め技術や当社独自の画像処理技術を取り入れて、パズルキューブを高速で解くロボットを開発した。開発に当たっては、当社製のFA機器を使って製作した。

1. ま え が き

社内向けモーター製造設備(巻線機)を開発するチームが製作したロボットが、パズルキューブを約0.3秒の速さで解くことに成功した。パズルキューブを早解きするロボット(図1(a))と巻線機(図1(b))、一見すると接点のない二つの装置に共通しているのが、本稿で述べる高速・高精度位置決め技術とAI画像処理技術である。特に高速・高精度位置決め技術は巻線機のコア技術の一つであり、より高性能なモーターを生産するために進化させてきた。また、AIを活用した画像処理技術は製造上の異常検知など様々な工程で有効な技術である。



(a) パズルキューブを早解きするロボット



(b) 巻線機

図1-パズルキューブを早解きするロボットと巻線機

2. キューブ早解きロボットに使われた設備技術

2.1 ロボットの動作と構成

ロボットでパズルキューブを解くためには、(1)ビジョンセンサ(カメラ)によって各マスが何色になっているかを認識する、(2)各軸を回転させる順序を計算する、(3)各軸を実際にアクチュエータで動作する、の手順が必要である。ロボットの構成を図2に示す。動作手順に従って各コンポーネントがどのような役割を担っているかを次に述べる。

- (1) それぞれがキューブの3面を捉えられるように、2台のビジョンセンサ(VS80)をキューブの角部に向けて配置している。スタートと同時に撮像を開始し、各マスの色情報を産業用パソコン(MI5000)へ送信する。パソコン上のAIプログラムが各マスを6色に分類し、死角にあるマスの色も推定して全54マスの状態を決定する。
- (2) 54マスの状態を基にパソコン上の解法探索プログラムでパズルの解法手順を導く。右面と左面のように同時に動かしても干渉しない組合せ、キューブのずれによる引っ掛かりが少ない回転方向など、各軸の動作を決定して2.2節に述べるカムデータの番号に変換し、iQ-Rシーケンサに送信する。
- (3) シーケンサが受信したカム番号をモーションユニット(RD78G)に逐次送信し、モーションユニットが6軸のサーボモーター(MELSERVO-J5)を同期制御する。各サーボモーターの出力軸に取り付けられた爪を各面中央のマスに嵌(は)めて回転させる。

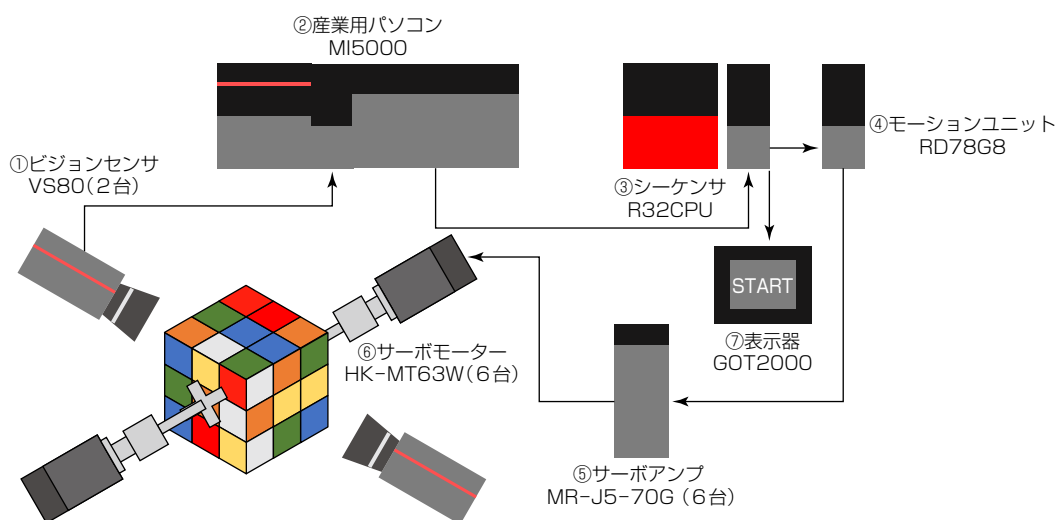


図2-当社製FA機器を搭載したロボットの構成

2.2 高速・高精度位置決め技術

動作時間を短縮するためにモーターの動作速度を大きくすると、オーバーシュートや振動を引き起こして、整定するまでの時間がかえって長くなることがある。また、整定するまでに角度がずれたキューブ(図3)を無理に回転させると破損につながるため、整定時間の短縮が動作速度向上での最重要な課題になる。

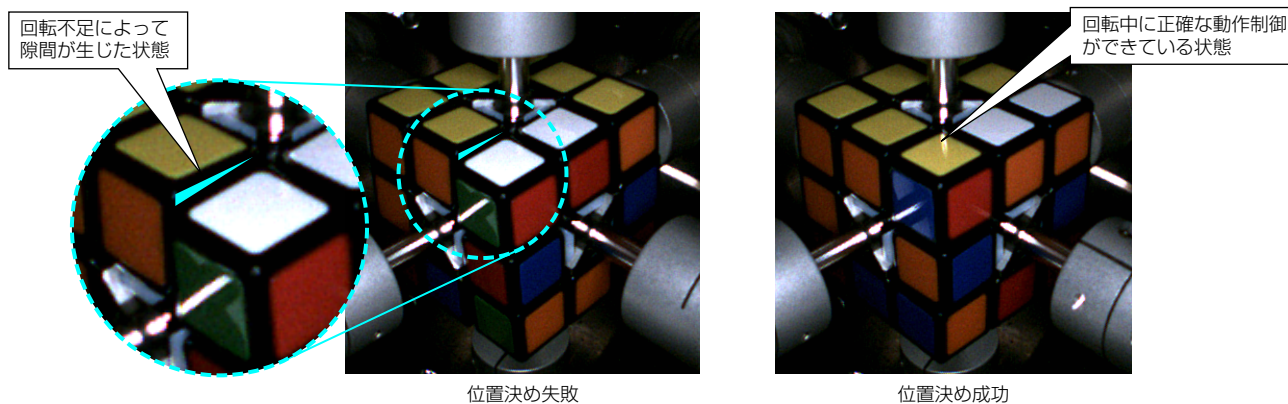


図3-パズルキューブの位置決め

整定時間が悪化する要因には、主に(1)機械系、(2)サーボシステムの制御、(3)ジャークの三つがある。

- (1) 機械系：超低慣性でパワーレートの大きいサーボモーターを、リジッドカップリングでキューブを掴(つか)む爪と直結させて剛性を高めるとともに、キューブの組み付け時の遊びを徹底的に低減した。

(2) サーボシステムの制御：今回採用したMR-J5サーボアンプのワンタッチ調整の機能を活用し、労せずに約0.5秒(相当)の動作時間を達成した。さらに、マシンアナライザ機能やデジタルオシロ機能などを使って手動によるゲイン調整を行い、最大トルク(定格トルクの3倍)で駆動しながら短時間で整定する動作を実現した。

(3) ジャーク：ジャーク(サーボモーターを回転させる際の加速度の変化量)が大きすぎると振動の原因になるため、速度・加速度をコントロールした運動曲線をモーションユニットに登録してカム制御を行い、ジャークを抑制した。

カムは90°正転, 90°逆転, 180°, 待ち, など数種類の動作に分割して事前に用意した。解法に従ってパソコンがカム番号を選択してシーケンサに送信し、モーションユニットに最初のカム番号を書き込んでサーボモーターを動かす。最初のカムの動作が終わる前にシーケンサが次のカム番号を書き込むことで、滑らかな動作を可能にした。

また、連続した回転動作を間髪入れずに行うためには同期制御も重要である。軸の動作完了を検出することなく次の軸を起動してもぶつかることがないため、スキャンタイムの影響を受けずに動作時間を縮めることができた。

2.3 AIによる高速色認識技術

パズルキューブを早解きするためには、短時間で各マスの色を認識して解法を探索する必要がある。今回は、認識精度を若干落とすとしても速度の速い方法を模索した。また標準的なパズルキューブに使われている6色(白, 青, 緑, 赤, オレンジ, 黄)の中で、オレンジは赤や黄に色味が近いので誤認識しやすいことも課題になった。

まず、k-PCA(Kernel-Principal Component Analysis)アルゴリズムを用いて色を分類するモデルを作成し、約5,000枚の画像から教師なし学習を行った。図4(a)に学習用画像のRGB(Red Green Blue)値の分布を三次元グラフで示す。各点は画像中のピクセルに対応するRGB値を示しており、同じ色のマスの中でも明るい領域から暗い領域に掛けて広がりを持った分布になる。赤いマスとオレンジのマスの分布が隣接しており、分類するための境界の決定が難しいことが分かる。図4(b)はk-PCAで二次元の特徴量空間に写像したRGB値の分布である。赤とオレンジの群に隙間ができ、計算量が多く低速な手法ながらも正しく見分けることが可能になった。

高速性が必要な実行時のAIは古典的な2層パーセプトロンとし、特徴量空間を用いずRGB値から直接に色分類を行うモデルとして計算量を削減した。さらにCPUのSIMD(Single Instruction Stream-Multiple Data Stream)演算を活用して実行時間を短縮した。まず、低速・高精度モデルから生成した学習データを用いた知識蒸留を行い、再び約5,000枚の画像を用いてファインチューニングを行った。ファインチューニング後の高速モデルによる分類結果を図4(c)に示す。隣接した赤とオレンジ色の群が塗り分けられており、分離するための境界を学習で獲得できたことが示されている。作成した高速モデルの誤認識率は0.1%程度であった。

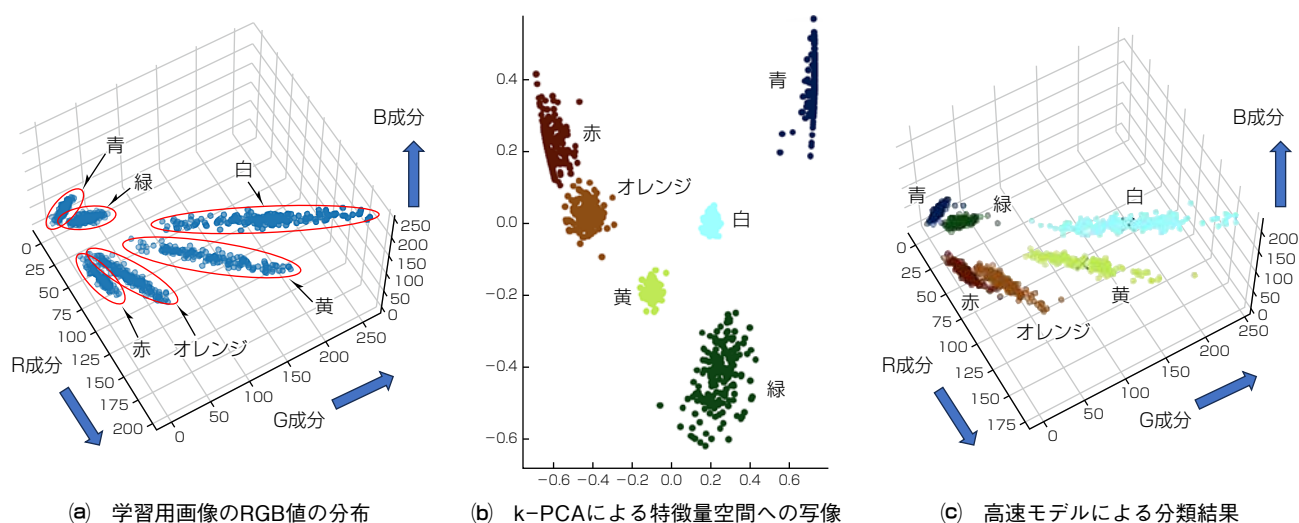


図4-画像のRGB値の分布

3. モーター製造用巻線機を支える設備技術

3.1 巻線機の構成と動作

最も基本的なスピンドル巻線機を例に述べる。図5に巻線機の主要部を示す。材料となる電線を、ノズルを通してワークに導き、 θ 軸でワークを回転させることでコイル状に巻き取る。巻き取るときには電線の位置を少しずつ正確にずらす必要があるためX軸でノズルを動かす。 θ 軸、X軸ともサーボモーター駆動であり、同期制御できる。



図5-巻線の主要部

3.2 高速・高精度位置決め技術

モーターの性能向上を目指して、決められた空間により多くの電線を巻き取るためには図6のように隙間なく正確に電線を並べていく必要がある。モーターに用いられる四角いコイルを巻く際に最も電線の密度が高くなる巻線方法は、図7に示すように3辺で電線を平行に並べて、残る1辺でノズルを動かして電線の位置を1本隣にずらす巻線方法である。ワークの回転は非常に高速なためノズルも高速で動かして止める技術が必要になる。

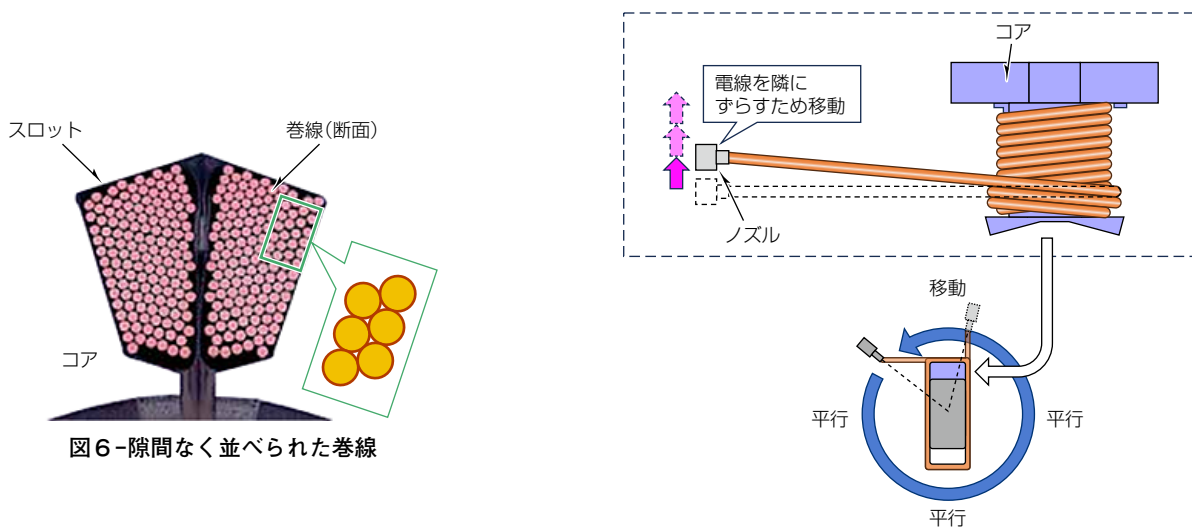


図6-隙間なく並べられた巻線

図7-巻線密度を高くする巻線方法

しかし、動作速度を単に大きくするだけではオーバーシュートや振動を起こして整定できなくなり、巻線機の場合にはコイルの寸法外れや線同士のこすれ等を引き起こす。この場合もキューブ早解きロボットと同様で、機械、制御、ジャークの三つが対策になる。

- (1) 機械系は低慣性で高剛性な設計と、ガタ・遊びの低減を徹底する。最高回転数の高いMELSERVO-J5の特性を生かして減速比を大きめにする、高剛性なカップリングを採用する、などで可能になる。
- (2) 制御系のチューニングについては、ワンタッチ調整で十分な結果が得られるようになった。デジタルオシロ機能を使い、サーボモーターの位置のグラフを取得することでノズルなどが正しく追従していることを確認できる。
- (3) モーションユニットのカム制御を活用することでジャークの少ない動作が実現できる。

また、ノズルを動かすタイミングがワークの回転角度に対して早まる、又は遅れると電線が予期せぬ場所に引っ掛かり、やはり品質不良を引き起こすおそれがある。モーションユニットの同期制御を使用して θ 軸とX軸の動きを同期させることで、キューブ早解きロボットと同様にシビアなタイミングでも正確に動作させることができる。

3.3 AI画像処理技術

巻線後のコイルの寸法などを、ビジョンセンサを使って検査することがある。今後、MELSOFT VIXIOを始めとしたAI外観検査技術を導入することで、これまで正常品との差異が識別困難であった異常の検知も期待できる。例えば図8に示すように、巻き乱れたコイルと正常品のコイルとの外径寸法の差はほとんどないが、AIによる画像処理を施すと、巻き乱れを認識できることが分かる。

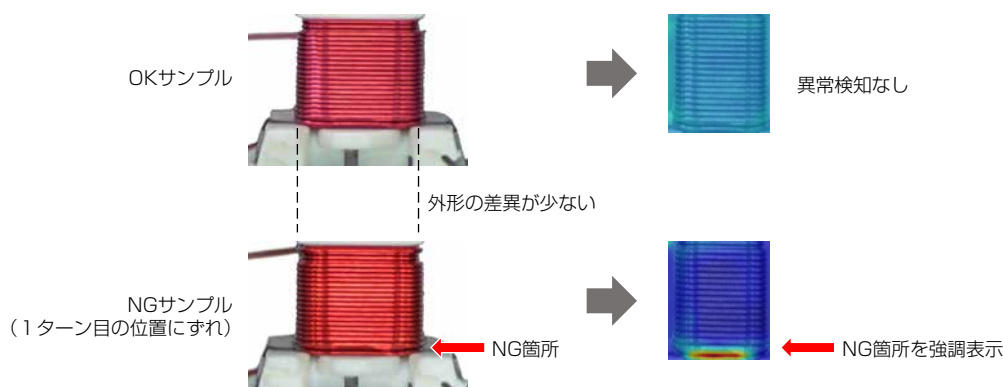


図8-AI画像処理技術による巻線NGの検知

4. む す び

パズルキューブの早解きロボットの開発を通じて当社がこれまでモーターの巻線技術で培った高速位置決め技術などの技術力に加えて、三菱電機FA製品を広く知ってもらう機会とした。今後も、製造現場の生産性向上や省エネルギーにつながる製品、サービスの提供を通じて、顧客企業の価値向上と社会全体のカーボンニュートラルの実現に貢献していく。