

アカデミック・スカラロボットのロボットプログラム教育への活用 新居 徹哉*

Stydy on Educational Applicaton of Acadmic SCARA-Robot. Tetsuya Nii*

要旨：昨年度本校制御機械科において、マイクロコンピュータ教育向け装置を刷新した。その際、これまでのマイコン制御中心の教材に加え新たにアカデミック・スカラロボットを導入し、プログラム教育に新たな教材として取り込み活用することとした。本稿ではスカラロボットについて解説するとともに、制御機械科の授業・卒業研究での活用について紹介する。

キーワード：スカラロボット Processing アカデミック・スカラロボット ロボット教育

1. はじめに

産業用ロボットは、製造業の現場では広く導入され活躍している。これまでは主にライン製造などの大量生産場面での利用が多かった。しかし、わが国の少子化に伴う労働人口の減少や高齢化による肉体的負担軽減の必要性から、ロボットの導入はますます広がる傾向にある。

本論文では、今回庄内校制御機械科で新たに導入した、アカデミック・スカラロボットについて紹介し、その教育授業展開について報告する。

2. スカラロボットの構造

スカラロボットとは、水平多関節ロボットというロボットアーム構造の一種で、Selective Compliance Assembly Robot Arm, 略してSCARAの通称である。

腕型作業ロボットを考える場合、通常は6自由度(6DoF)を有し、3次元空間上の手先の位置(X, Y, Z)と同時に手先の向き(X_r (Yaw), Y_r (Pitch), Z_r (Roll))も独立に定めることが出来る。人間の腕もこれ相当以上の自由度を持ち、たとえば、溶接や塗装などの作業を行う場合には、局面上の線をなぞる動作などが実現可能である。しかし、高い自由度を実現するため、関節が多く、サイズ・重量・コストのいずれも多く、また、制御のための計算も複雑である。

それに対して、SCARAの特徴は、自由度を抑えていることであり、そのうち2自由度で水平面内(X,Y)の移動、1自由度で上下移動(Z)をカバーし、対象への接近方向を作業平面に対して垂

直方向に制限することにより、把持のためのヨーイング(面内回転)の自由度、合計4自由度で水平面内作業を実現する仕組みとなっている。

2-1. スカラロボットの力学

一般的にアーム型ロボットのような駆動部(関節)と支持構造(リンク)で構成される駆動器をマニピュレータと称する。6自由度以上を持つマニピュレータであれば、手先を目標とする位置に動かし、また目標とする軌跡を描きながら移動することが可能である。手先位置・方向を実現するために関節を駆動し、角度を定め、リンクが動くことにより空間内で変位を実現する。

このとき、関節の角度から手先位置・姿勢を計算するためには関節角度 θ_{i-6} から(X, Y, Z, X_r , Y_r , Z_r)を計算する必要がある。この計算を運動学計算といい、6変数の三角関数を含む非線形の連立方程式となる。また、逆にロボットの目標とする姿勢から、各関節がとるべき角度姿勢を求める計算を逆運動学計算という。逆運動学計算は6自由度マニピュレータでは運動学方程式の逆関数で求められるが、非線形性のため一般解は存在せず、マニピュレータの構造から逐次解を求める、もしくは微小変位に対する応答から逐次計算により求めていくしか方法がない。

これに対して、SCARAの場合は、2リンクマニピュレータに相当する平面内の動作(X, Y)と上下動Zが完全に分離されているため、手先の座標を表す方程式は2元の連立方程式となる。図1に2リンクマニピュレータの運動学モデル(a), 式(1)に平面内の運動学計算の式を表す。

* 山形県立産業技術短期大学校庄内校
〒998-0102 山形県酒田市京田三丁目 57-4

* Shonai College of Industry & Technology
3-57-4 Kyoden, Sakata City, Yamagata, 998-0102, Japan
e-mail: nii@shonai-cit.ac.jp

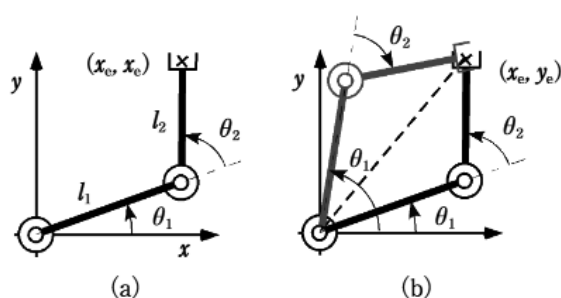


図1 2リンクマニピュレータの運動学モデル

$$\begin{aligned} x_e &= l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y_e &= l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (1)$$

この方程式も非線形連立方程式ではあるが、 θ について一般解を求めることができる。求めた逆運動学計算の解を式 (2) に示す。

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \pm \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - x_e^2 - y_e^2}{2l_1 l_2} \right) \right) \\ \theta_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{y_e}{x_e} \right) \pm \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + x_e^2 + y_e^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{x_e^2 + y_e^2}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中に±が登場するが、これは SCARA においては動作範囲のほとんどにおいて図 (b) のように2つの姿勢を取り得るためである。実際の制御においては、このうち、元の姿勢との差分が小さいほうを採用すれば良い。

次にマニピュレータの軌跡追従について説明する。マニピュレータの運動方程式を求めて、各関節に与えるトルクからマニピュレータの姿勢（位置）、動き（速度・角速度）、発生する力（加速度・各加速度）を求める。（動力学モデル）ここに、目標とする軌道を実現するための姿勢・速度の情報を与え、それを実現するために必要となる関節トルクを求める（逆動力学計算）ことにより求めることが可能である。この方法を逆動力学法というが、高次の非線形連立微分方程式を解く作業が必要であり、また一般解もないため多大な計算力が必要となる。そのため、溶接などの特殊ななぞり動作が必要な場合以外にはあまり用いられない。

一般的には、軌跡を一定時間毎に分割し、モータコントローラの目標値制御・目標値追従制御機能などのサーボ制御機能を用いて実現する。

この方式の場合は、目標の軌跡上の分割点について、逆運動学計算によって関節角度を求めてゆけば良いため計算負荷は低減できるが、トルクは不連続な変化をするため、厳密には追従に誤差が生じる。

2-2. アカデミック スカラロボット

今回、本校制御機械科でロボット学習用に導入した、多関節腕型ロボットの一種である、ヴィストン株式会社製アカデミック スカラロボットについて紹介する。名前の通り、教材向けに開発されており、SCARA 型とすることで三角関数などの高校生レベルの数学でロボットの座標計算を行うことが可能であり、また、SCARA 型のもう一つの特徴であるコンパクトさから、専用ケースにコンパクトに収納、組立・運搬も容易となっており、共通教材として利用しやすくなっている。アカデミック スカラロボットの写真を図2に示す。



図2 アカデミック・スカラロボット
(左：組立状態，右：収納状態)

本体の3自由度の空間移動に加え、アーム先端の回転及び開閉式のハンドを設け、計5自由度を有し、把持動作を行わせたり、手先を使わずペンホルダを取り付け、2+1自由度の動作軌跡による図形描画なども可能である。

ロボットの制御は、PCからUSB接続により通信制御を行うため、Windows PCで実習可能である。C言語によるロボット制御プログラムの製作学習のためのサンプルプログラムなども付属している。また、さらに、ロボット導入入門のためのモーションエディタソフトウェア「SCARA Programmer」が付属し、ロボットの動作を

- ・座標・関節角度の数値入力
- ・マウスによるGUI操作
- ・ロボットのポーズ読み取り機能を利用して実際のロボットを動かしての指示

など、プログラムを行わないでも、ロボット制御の体験が可能になっている。図3にSCARA Programmerの実行画面を示す。

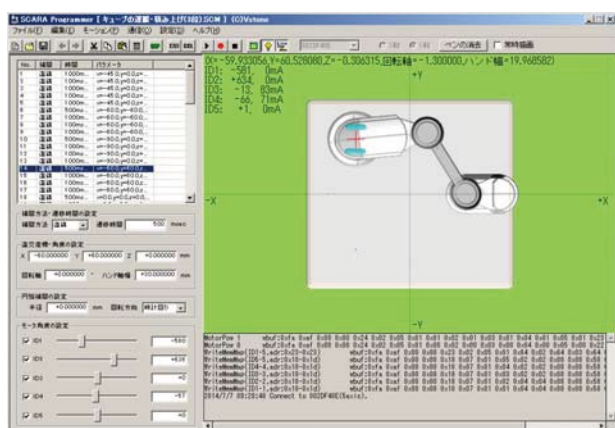


図3 SCARA Programmer 画面

3. ロボット学習

ロボットについての学習は、現在、2年次のシステム制御実習で取り組んでいる。この授業では、A/D変換はじめインタフェース技術、制御理論基礎、モータを題材とするサーボ制御の課題の後、制御の実習を行うカリキュラムとなっていて、今年度から、制御対象としてアカデミック・スカラロボットを利用することとした。

3-1. ロボット基本動作とモーション制御

ロボットの動作とアーム型ロボットの動作域、姿勢や経路の影響などについては、SCARA Programmer を用いて体験・学習する。SCARA には、XY 平面上で腕の伸びきった点に特異点があり、その状態からは移動方向・速度が制限される。また、可動範囲内であっても、運動学で述べた2解の切り替わり点をまたいだ移動では異常挙動が起こるなど確認ができる。これらの知識は、腕型ロボットすべてに共通の現象であるので、将来のロボット利用時に役立てられると考える。また、SCARA Programmer には、各モータの電流値を表示する機能が搭載されている。これを用いることで、同じ運搬動作でも、出発点から目標点のみ指示してサーボ制御により制御をおこなった場合と、補完動作を行った場合で最大電流（＝モータ最大トルク）が減少し、かつ到達時間が短縮できるケースなども確認出来て、ロボット制御に力学的考察を持ち込むことで作業速度の向上や、モータ負荷の軽減によって機械の消耗軽減・トラブル軽減に役立てることができることなどが学習できる。



図4 2リンクマニピュレータ運動学シミュレータ (Processing 言語により実習で作成したもの)

3-2. ロボット運動学計算とプログラム

実際に、ロボットを自作プログラムから制御する実習を行う。プログラミング言語としては、Processing 言語を用いている。Processing は、オープンソースのプログラミング言語開発プロジェクト、および言語であり、統合開発環境でもある。初心者の方のプログラム学習に適した、Java 言語由来でグラフィック機能・GUI 機能に特化したプログラム言語である。

ロボットのプログラムにおいては、ロボットに対してキーボード等から数値入力・指示を行ったり、画面上で必要な操作をマウスで指示したり、ユーザインタフェースが大きな割合を占めることになる。また、ロボットの姿勢・動作などを画面上で確認できるためには、グラフィック表示が必要になる。これらを Windows 上の既存のプログラム言語で実現しようとする場合、Windows のプログラム学習だけでもかなりの時間・労力をかけなければならないが、Processing 言語であれば、元々プログラム初心者向けに作られており、また、関数名・機能などは、C 言語学習者であれば、そのまま利用可能な範囲の差異である。また、ロボット制御に必要な数学計算については、Java 言語の関数があるまま利用できるため問題にならない。

図4に実際に授業で製作した Processing で動作するロボットの運動学シミュレータによる手先移動経路の直線補完プログラムを示す。画面上に棒状に表された SCARA の平面内リンクが、先端が直線を描くように移動するよう角度を求めて、それを表示している。また、このプログラムから、ヴィストン社のサンプルプログラムをコンパイルして作成できる Windows のコマンドラインの実行ファイルを利用、プログラムに引数として目標関節角度を渡すことで、実際にロボットを動かす

ことができる。この時、Processing プログラムから Windows のコマンドライン命令を実行する形になるため、Java の Process クラスを用いて、外部プロセスとして実行する。

3-3. 卒業研究での活用

ロボット教材の開発とロボット応用提案のために、卒業研究でもアカデミック スカラロボットを利用、画像処理を用いたばら積みロボットの開発を行った。プログラム開発には、引き続き Processing 言語を用い、PC 用の USB カメラを用いロボットの作業範囲をカバーするよう画像取り込みを行った。なお、画像は作業平面に置いた透明アクリル板の裏側から取り込むようにし、そのために作業台を製作した。図5に実際に製作したロボット作業台を示す。このような構造とすることで、ロボットの作業空間全体をカバーし、かつ上面から取り込む場合と異なりロボット自身が影となり死角が生じないようにすることができる。

図6に画像処理からロボットによる物体検知・移動を行う作業の様子を示す。目標物はカラー枠を付けたスポンジキューブである。スポンジキューブを配置しカメラから取り込んだ画像に対して、キューブ配置前の画像を引き算する。こうすることで、キューブ以外の背景を消すことができる(背景除去)。続けて、ノイズ除去、単色抜き出しを行い、赤成分のみ取り出す。これで赤色キューブの位置・形状情報が取り出せる。

この情報から、重心計算・画像モーメントから主軸ベクトル計算を行い、それらの値を用いて、ロボットの手先位置・手先ピッチを動かし、把持動作を行うことで、ばら積み対象のピックアップ動作が実現できた。

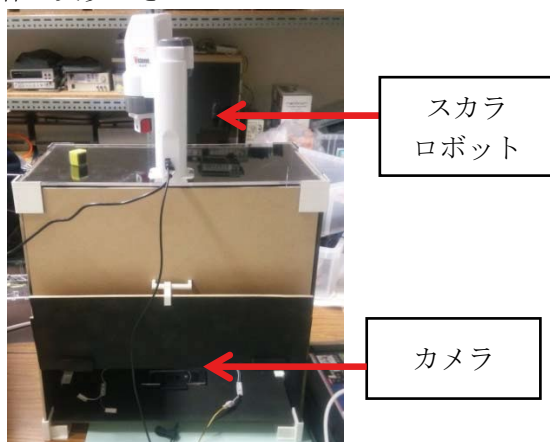


図5 バラ積み実験作業台 (+ロボット)

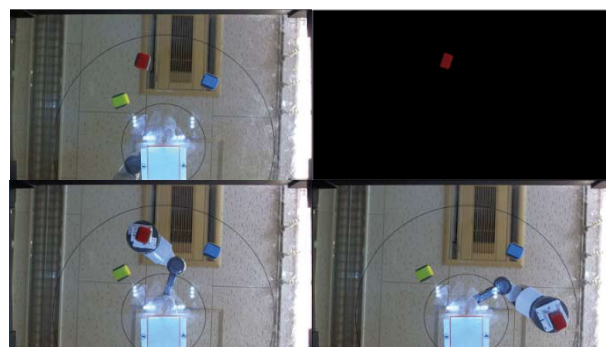


図6 ロボットによるピックアップ動作

左上：カメラ取り込み画像
右上：差分画像から単色抜き出し
左下：ピックアップ動作
右下：指定位置への運搬動作

4. おわりに

本校制御機械科で今年度新たに導入したアカデミック スカラロボットを対象に力学系シミュレーションを行うプログラム作成を通して、力学系の計算プログラム学習、グラフィックス表示プログラム学習、自動制御と広範囲の学習に取り組めるよう教材化を行った。同時に現代の産業用ロボットの活用につながるマニピュレータの構造・制御の考え方・動かし方について学習できるように課題化した。さらに卒業研究ではより高度な利用を目指し、作業プログラムに取り組んだ。今後はこの成果を授業に展開・活用したい。

謝 辞

最後に、卒業研究においてスカラロボットの活用に取り組み、システムやプログラムの開発を行い、カメラ台製作、画像処理関係の開発・データ提供を提供してくれた新居研究室、伊原弘雅氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 牧野洋, 村田誠, 古屋信幸「SCARA ロボットの開発」, 『精密機械』第48巻第3号, 1982年, pp.378-383
- 2) アカデミック・スカラロボット商品紹介/サンプルプログラム https://www.vstone.co.jp/products/scara_robot/