

解説

生産分野に向けた作業知能：産業用ロボットを進化させる知能化技術

Manufacturing Intelligence to Evolve Industrial Robot

野田 哲 男* *三菱電機株式会社
Akio Noda* *Mitsubishi Electric Corporation

1. はじめに

次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト（平成 19 年度経産省，平成 20～23 年度 NEDO，以下，知能化 PJ）では，再利用可能な多数の知能モジュールを開発し Web サービスの如く知能モジュールを柔軟に組み合わせて多様な自律ロボットアプリケーションを構築することが目標であった [1]。

知能化 PJ 内で，筆者らの研究グループ（三菱電機・京都大学・神戸大学・関西大学）は，産業用ロボットを用いた生産システムを構築するシステムインテグレータの立場を取り，他のプロジェクト参画者が開発したモジュール群を最大限利用しつつ，機種切替が迅速で，かつ長時間連続操業可能な，生産現場へ導入できるロボットセル生産システムを実現するために必要な知能モジュール群と，それら知能モジュールによる統合システムの開発を目的に，研究開発を実施した。

筆者らのグループでは研究開発を始めるにあたり，必要とされる基本モジュール群を選定するために，まず生産分野における製品の組立工程に不可欠な知能ロボットアプリケーションとして，部品供給，組立，（後工程への）払出に至る 9 種を選定した。次に，これらアプリを実施するのに必要な要素機能へトップダウンから分解する一方で，各要素機能からボトムアップしてアプリへ再統合するという双方向の検討を実施した。その結果，25 種類の知能モジュールが必要十分であることが分かった。検討結果に従って，三菱電機が実用化開発，システムインテグレーション，一部のコア技術開発を担当し，京都大学，神戸大学，関西大学がコア技術を提供する体制で，上記 25 種類の知能モジュールのうち，他の開発者を補完する知能モジュール群，システムインテグレーションソフトウェア，同ソフトを用いた統合システム（模擬セル生産ロボットシステム）を開発した [2] [3]。コア技術については，目前の課題をいきなり解

き始めるのではなく，その課題の困難さの本質を原理原則に立ち返って解くことにした。統合システムは，ライン生産，人セル生産に加え，生産システムに新しい選択肢を与えるセル生産ロボットシステムを構築した。

本稿では，開発した知能モジュール群と，それら知能モジュール群を用いた統合システムについて述べるとともに，最近の研究開発動向を俯瞰し，産業ロボットのさらなる進化を目指した今後の研究開発の方向性を考察する。

2. 知能モジュールとシステムインテグレーション

ロボット知能化というと，不確実で予測困難な要素を含む複雑作業をロボット化するために用いられるとの印象がある。確かにそのとおりでもあるが，この技術の産業価値は，生産システムにおける各種コスト削減に主眼がある。

産業用ロボットを用いた生産システム全体の主要コストは，実は，エンジニアリングコストである。例えば，典型的な組立作業系のロボットシステムの見積りの内訳を分析すると，全体のおおむね半分以上を設計・据付・調整といったエンジニアリングコストが占めていて，これが当該案件ごとのカスタマイズに費やされていることが分かっている。このようなコストを下げることは，目まぐるしく変動する市場環境で利益を上げ続けるための新しい生産システムにおいて，必達の課題である。そこで，筆者らの研究グループは，機種切替時の作業コストの低減，運用時の長時間連続操業によるロスコスト削減を実現し，生産現場へ導入できるロボットセル生産システムの実現を目指した。

最終的に，統合システムにおいて，教示時間短縮 3 分の 1 以下，ロボットが同一動作を繰り返す際のタクトタイム短縮 44%，チョコ停（装置故障を伴わない生産停止）が発生した際，多少のタクトタイムの増加を伴いながらの自動復帰動作実現，10 種以上の小型電気電子製品の部品のばら置き状態からの組み付け実行実現，をそれぞれ確認し，知能化 PJ の基本計画の中間目標および最終目標を達成，所期の成果を得た。開発した知能モジュールとそのインテグレーションを図 1 に四角で示し，以下の (1)～(5) の各群に分類しながら各モジュールの内容を解説する。なお，各知能モジュール名について「A モジュール」は単に「A」と

原稿受付 2012 年 10 月 1 日

キーワード：Industrial Robot, Intelligent Technology

*〒 661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1

*Amagasaki-shi, Hyogo

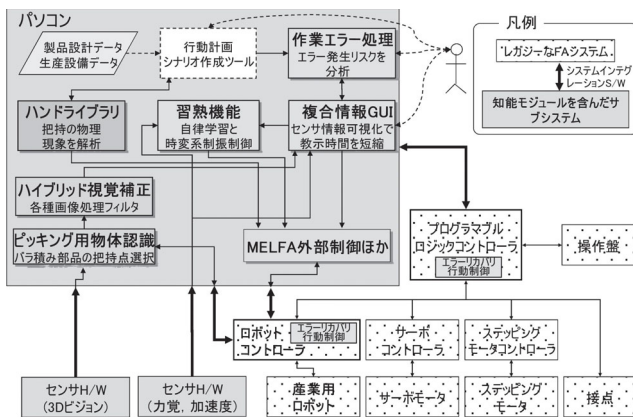


図1 知能化モジュールとシステムインテグレーション

記す。

(1) システムインテグレーションソフトウェア群

手堅く作られたレガシーなFAシステムに、新しい価値をもたらす知能モジュール・サブシステムを追加することで、産業用ロボットシステムが従来どおりの安定性を保ちながら進化する。このような考え方で統合システムを構築することにし、新旧のサブシステム間を結合するためのシステムインテグレーションソフトウェアを開発した。図1の太い矢印の位置で本ソフトウェア群が動作する[4]。

(2) オフライン教示支援知能モジュール群

ロボットが目前にない状態をオフライン、ロボットを目前にした状態をオンラインと称している。

- ・ハンドライブラリ：ロボットハンド設計製作と制御則プログラミングを迅速化し、さらには手戻りを減らすことが課題。ロボットハンドにより対象物を把持する際の過渡現象を解析し、対象物体の初期位置ズレとハンドの指の制御方法との関係から、把持の成否を推定するモジュール[5]。
- ・作業エラー処理：作業エラーを抑制できる作業シーケンスのプログラミング手法およびエラーリカバリプログラムを理論的根拠に基づいて得ることが課題。ロボットの作業中に生じるチョコ停に対して、ベイジアンネットワークを時間的に拡張したダイナミックベイジアンネットワーク(DBN)を用いて、ロボットのエラー状態(あるいは非エラー状態)を動的に推定・解析するモジュール[6]。

(3) オンライン教示支援知能モジュール群

- ・複合情報GUI：ティーチングボックスと呼ばれるリモコン箱を手にしたオペレータがロボットに動き方を教える教示作業は、作業者の技量に依存して、作業時間と作業結果が変動し、そのノウハウレス化、時短化が課題。作業の進行状態を作業者に知覚させることで作業者の技量によらず作業時間を短縮し結果を安定化させるGUIを、ヒューマンインタフェース理論に基づいて導出した

モジュール[7]。

- ・習熟機能：同一作業を繰り返すことで、その作業に習熟していく人間作業者の能力をロボットに取り込むことが課題。タクト短縮が可能な軌跡等を求める独自の能動学習アルゴリズムで構成したモジュール[8]、および独自のインプットシェーピング法により、時変系の多軸同時高速動作後の残留振動を抑制する制御指令を生成するモジュール[9]。

(4) エラーリカバリ支援知能モジュール群

- ・複合情報GUI：ロボットシステムの復旧・移設・複製・改修時に、エンジニアリング時間を短くすることが課題。作業対象物に対し、ロボットがどのような相対位置姿勢にあるかを、センサ計測値を処理して作業者に知らせることで、ロボットの故障時、移設時、複製時などにおける再教示作業時間を短縮するモジュール[10]。
- ・エラーリカバリ行動計画：チョコ停からの自動復帰が課題。チョコ停発生を検知した後、自動復帰行動を生起するロボット言語あるいはシーケンスプログラム中のモジュール(スタブ)。ここから復帰行動に分岐して、タクトタイムの増加を伴いながらも自動復帰することを確認。

(5) 認識支援知能モジュール群

- ・ピッキング用物体認識：組立対象部品のバラ積み供給において、バラ積み状態の認識が課題。独自の三次元ビジョンセンサからの距離画像情報を処理して、バラ積み部品をつまみ上げるための把持点を認識するモジュール[11]。
- ・ハイブリッド視覚補正：ビジョンセンサを用いた認識プログラミングの迅速化が課題。三次元ビジョンセンサから得られた距離画像と二次元画像情報を融合し、教示作業に有効な作業ポイントを対話的に提供するモジュール[12]。

3. 統合システム

ロボットによるセル生産の典型例として、二つの統合システムを構築した。二つの統合システムの関係であるが、例えば、工場内で、バラ積み部品供給システム(図2)が、部品トレイ上に部品を整列させ、その部品トレイが自動組立システム(図3)に搬送され、部品から製品へと組み立てられる、というような普遍的かつ汎用的なセル生産ラインレイアウトを想定している。

3.1 自動組立のためのバラ積み部品供給システム

自動組立システムでは、部品供給が問題になる。現状は、パーツフィーダと呼ばれる専用装置、あるいは人手に頼っており、機種切替時のリードタイム、コスト、フットプリントなどに問題がある。これまで、ロボットによる自動化も試みられてきたが、最近ようやく吸着パッドで吸い付けられる板金物、軸物、穴があって内掴み可能な物など、部品の形状を限定した上での実用化が見えてきた段階にある。そこで今回、より複雑な形状のバラ積み部品供給を、統合

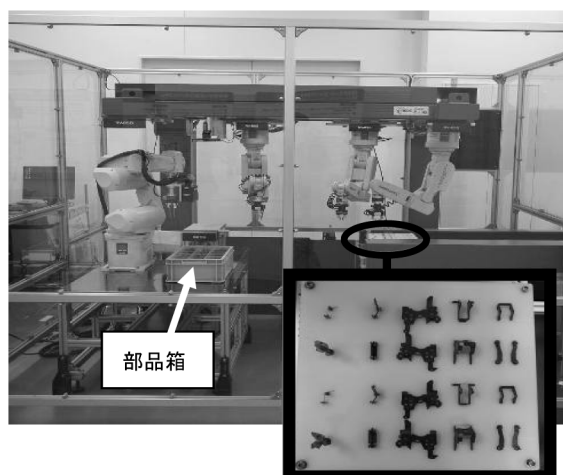


図 2 バラ積み部品供給システムと部品トレイの例

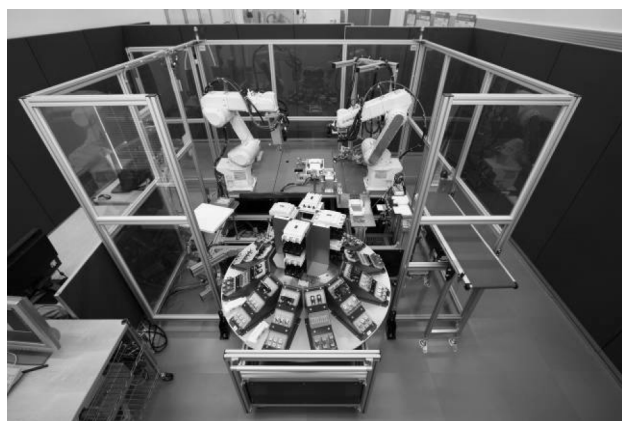


図 3 自動組立システム

システムの例題とした。

図 2 に構築した統合システムを示す。4 台のロボットを用いて、バラ積み部品箱内の部品を外掴みで取り出した後、部品を持ち替えて、その姿勢を整え、太線枠内に示した部品トレイ上に整列させていく。人手に頼るしかなかった複雑な形状の部品を、最速 3 秒台で整列させられることを確認した [13]。このとき、ロボット台数とタクトタイム、対象部品形状の複雑さには関係があることも分かった [14]。

このシステムで、複合情報 GUI、ピッキング用物体認識、習熟機能、作業エラー処理、ハンドライブラリなどの知能モジュールを用いてシステムを構築、バラ積み部品整列機能が実現するとともに、システムに対して、立上、稼働、移設、復旧の局面を与えたとき、各知能モジュールにより「機種切替が迅速」「長時間連続操業可能」の各機能が発揮されることを確認した。取り扱うバラ積み部品を、新たに追加登録するときの汎用化手法などは、今後の課題である。

3.2 自動組立システム

約 10 [cm] 立方から 60 [cm] 立方程度のサイズの、部品点数数 10 点程度、多品種中量生産の電気電子製品の自動組立



図 4 組立対象の小型電気電子製品の例

を例題にした。図 3 にその写真を示す。この統合システムにおいて、部品の供給（図中手前の円盤状の部品台車から）、組立、検査、払出（右下のコンベアによる）という一連の生産活動が、1 カ所で実施される [2]。すなわち、典型的なロボットによるセル生産システムの構築事例である。図 4 に、対象ワークの例を示す。この統合システムでも、先のシステムと同様に知能モジュールによる効果を確認した。

4. お わ り に

知能化 PJ の「作業知能（生産分野）の研究開発」の開発成果について、述べた。

本 PJ 開始以降、欧米のロボット用のソフトウェア開発が急進し、産学官連携活動施策の継続的あるいは新規の展開、さらにはロボットメーカー各社が開発を進め、ベンチャーも起業し始めている。以下、世界の主要な動きを列挙する。

例えば、Universal Robotics 社の Neocortex [15] や Willow Garage の ROS (Robot Operating System) に対する Southwest Research Institute の産業用ロボット向けのコレクションパッケージ ROS-Industrial [16] がある。ROS-Industrial には、Adept、安川電機米国法人が関与している。Microsoft の Robotics Developer Studio と低価格三次元センサ Kinect は、パソコンの高い計算能力と高効率な開発環境、外界センサフィードバック制御を、ロボットシステムに安価に援用できる [17]。簡単に使える産業用ロボットの、コンセプトからの開発例として KUKA の LWR [18]、ABB の FRIDA [19] があり、Brooks 氏の Rethink Robotics [20] の開発内容も 2012 年 9 月に明らかになった。国家施策としては欧州の様々な産学官連携に加え、米大統領がカーネギーメロン大学での演説 [20] に至った事情には考えさせられる。アジアでも中国の新松机器人自动化股份有限公司や広州数控設備有限公司に代表されるロボットメーカーが製品やビジネス展開について進化を加速している [21]。同国国策については 2012 年 3 月 27 日付けの中国科学技術部の智能製造科学技術発展第 12 次 5 年特別規則的通知 [22] に、現状は輸入に頼っている製造技術について、“智”能化技術開発に注力し、モノづくり力を高めることが記されている。

つまり、日本は、これまでのアドバンテージを活かして、開発した次世代ロボット知能化技術の実用化をすすめて、

雇用と所得への寄与を前提とする革新的なロボット技術の研究開発の中長期的計画立案と、その遂行に、ただちに着手すべき段階に入っていると考えられる。

産業用ロボットは、その誕生から 30 年来、設計概念が変化していない。具体的には、ロボット手首のフランジ面が、高速高精度に目標位置姿勢を再現する機能に特化して最適化設計され進化してきた。その意味において産業用ロボットは成熟し、同時にロボットを活用できる範囲も確定した。

さらなる発展のためには、ロボットを利用する目的を今一度再考し、ロボットシステムの成り立ちを、材料と制御から、ゼロ・ベースで組み立て直す新たなイノベーションにチャレンジすべきである。そこには産業用ロボットのみならず、サービスロボット、災害ロボットにも共通の課題が存在し、その成果は、機械システム全般の革新にも波及しうる。

世界で続発する未曾有の大災害への対処、人口動態変容への対応、および、製造業にとって最も過酷な、垂直変動する需給バランスに対峙する最適解を、走りながら考え続け、ロボット屋として答えを出すことが、期待されている。

謝 辞 本稿で紹介した技術の一部は NEDO 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクトの結果、得られたものである。

参 考 文 献

- [1] http://www.nedo.go.jp/activities/EP_00204.html
- [2] 野田哲男, 奥田晴久, 田中健一, 永谷達也, 北明靖雄, 堂前幸康, 榎木哲夫, 横小路泰義, 堀口由貴男, 幸田武久, 宇津野秀夫, 松久寛, 水山元, 小森雅晴, 泉井一浩, 西脇眞二: “次世代セル生産を実現するロボット知能化技術”, 第 10 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, 1L3-4, pp.766-769, 2009.
- [3] 田中健一, 榎木哲夫: “セル生産を実現するロボット知能化技術開発の展望”, 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, 1J2-2, pp.657-659, 2010.
- [4] 野田哲男, 永谷達也, 長野陽, 奥田晴久, 北明靖雄, 堂前幸康, 田中健一: “セル生産ロボットにおける知能化技術のシステムインテグレーション”, 第 10 回計測自動制御学会 SI 部門講演論文集, 1L2-5, 2009.
- [5] 土橋宏規, 横小路泰義, 野田哲男, 奥田晴久: “準静的押し操作解析に基づく把持シミュレーションと対象物体の許容初期誤差範囲の導出”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.10, pp.1201-1212, 2010.
- [6] 阪田隆司, 幸田武久, 野田哲男, 長野陽, 永谷達也: “エラー解析に対するダイナミックペイジアンネットワークの応用”, 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, 1E1-3, pp.323-325, 2011.
- [7] 堀口由貴男, 黒野晃平, 中西弘明, 榎木哲夫, 永谷達也, 野田哲男, 田中健一: “産業用ロボット教示作業支援のための複合情報 GUT”, 計測自動制御学会論文集, vol.47, no.12, pp.656-665, 2011.
- [8] 野田哲男, 永谷達也: “能動探索アルゴリズムによる産業用ロボットの動作習熟”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, RSJ2008AC1F2-02, 2008.
- [9] 中本崇志, 宇津野秀夫, 松久寛, 山田啓介, 澤田勝利, 野田哲男: “多関節型ロボットアームの残留振動を抑制する加減速パターン”, 機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2012.
- [10] 永谷達也, 野田哲男, 田中健一: “座標系校正による産業用ロボットの位置復旧支援技術”, 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, 1E2-6, pp.348-351, 2011.
- [11] 堂前幸康, 奥田晴久, 北明靖雄, 永谷達也, 野田哲男: “物体形状に依存せず高速なバラ積み物体の取り出し方法”, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, RSJ2011AC3B2-1, 2011.
- [12] 奥田晴久, 北明靖雄, 野田哲男, 田中健一: “3 次元情報の逐次的利用に基づくロボットへの作業教示”, 第 10 回計測自動制御学会 SI 部門講演論文集, 1L2-4, 2009.
- [13] 野田哲男, 堂前幸康, 永谷達也, 長野陽, 田中健一: “ロボットによるバラ積み部品供給”, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, RSJ2011AC3B2-2, 2011.
- [14] 野田哲男, 永谷達也, 堂前幸康, 長野陽, 北明靖雄, 田中健一: “バラ積み部品供給可能なセル生産ロボットのシステム設計論”, 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.330-332, 2011.
- [15] <http://www.universalrobotics.com/neocortex>
- [16] <http://rosindustrial.org/>
- [17] <http://www.microsoft.com/robotics/>
- [18] <http://www.kuka-robotics.com/en/products/addons/lwr/>
- [19] <http://www.abb.com/cawp/abbzh254/8657f5e05ede6ac5c1257861002c8ed2.aspx>
- [20] <http://www.whitehouse.gov/blog/2011/06/24/developing-next-generation-robots>
- [21] そろそろ日本の産口ボらしい付加価値の追求と議論を!—上海国際ロボ展から現地メーカーの動向を探る, <http://www.robonable.jp/trend/2012/07/ir-0724.html>, 2012.07.24.
- [22] 智能制造科技发展“十二五”专项规划, 中华人民共和国科学技术部, <http://www.most.gov.cn/tztg/201204/W020120424327129213807.pdf>, 2012.



野田哲男 (Akio Noda)

1987 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了, 同年三菱電機 (株) 入社。産業システム研究所などを経て, 2002 年同社先端技術総合研究所主席研究員, 現在に至る。産業用ロボット, FA 加工機, 生産情報統合など, 機械システムの知能化技術の研究開発に従事。システム制御情報学会, 日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)