環境・作業情報構造化を利用したロボット作業技術

Robot Manipulation Technology Using Environment and Manipulation Frameworks

吉見　卓　■ YOSHIMI Takashi
香月　理絵　■ KATSUKI Rie
大賀　淳一郎　■ OGA Jun'ichiro

近年，人間共存・生活支援ロボットの実現に向け，環境構造化と呼ばれる新しい考え方が広まってきている。これは，ロボットのために人間の生活環境側に手を加え，そこでのロボットの作業の定型化を進めることで，ロボットの実用化を容易にしようとする試みである。また，環境側にロボットへの情報提供機能を持たせ，より高度な作業を行わせる取組みも進められている。

東芝ではこれに加え，構造化した環境の下で動作するロボット作業ソフトウェアの構造を共通化する，環境と作業情報の構造化に取り組んでいる。これにより，情報とソフトウェアの共有が図られ，異機種ロボットによる作業，異環境での作業の定型化による人間共存・生活支援ロボットの簡便な実現が期待される。

The new concept of structuralizing a robot's working environment has recently been introduced to realize human-symbiotic robots that support daily life. The aim of this concept is to assist robots' activities by modifying the living environment and constructing a suitable environment framework for them. Moreover, the function of supplying information about the environment is implemented in the robot's working environment in order to facilitate manipulation of the robot system.

In addition to the development of an environment framework, Toshiba has been developing a manipulation framework that works under a structuralized environment and has a common structure of robot software. These environment and manipulation framework technologies are expected to realize common information and software for many robot systems, enabling them to work for different robots in different environments.

1　まえがき

少子高齢化社会の到来を控え，人手不足を補う切り札として，日常生活の様々なシーンでわれわれをサポートしてくれる，人間共存・生活支援ロボットの登場が期待されている。

現在多くの研究機関で，これまでの産業用ロボットの研究開発で培ってきた技術をベースに，人間共存環境で人々に様々なサービスを提供するロボットの研究開発が精力的に進められている。産業用ロボットの場合は，ロボットに合わせて作業現場を整備したうえで，同一の作業を同一のロボットで繰り返し行うことが中心であった。しかし，人間共存環境で動作するロボットは，産業用ロボットと異なり，変化する環境に柔軟に対応しながら目的の作業を遂行できる高度な能力が要求される。このため，実験室環境でロボットが動作できても，それをわれわれの通常の生活環境で安定に動作させるのは容易ではなく，なかなか実用レベルのロボットが登場していないのが現状である。

このような状況を打破するため，近年，ロボットが動作しやすくなるように，人間の生活環境に手を加えることで，ロボットの実用化を容易にする試みがいくつか提案されている[(1)]。これは，産業用ロボットが作業現場を整備することで確実に作業を遂行しているのと同様の考え方を，人間の生活環境に導入するものである。更に，環境側に情報提供機能を持たせることで，ロボットにより高度な作業を行わせる試みもある。具体的には，ロボットが作業を行う際に，作業に必要な情報を，作業対象側からRFID（Radio Frequency Identification）タグなどを介してネットワーク経由で獲得する。この情報を利用することで，ロボットがより多くの対象物，より多くの作業にフレキシブルに対応できるようになる。このように，ロボットが動作しやすくなるように人間の生活環境に加えた工夫が，環境構造化である。

東芝は，この環境構造化に加え，構造化した環境の下での作業情報構造化について，独立行政法人 産業技術総合研究所（以下，産総研と略記）及び東京大学と共同して取り組んでいる。これは，構造化した環境の下で動作するロボット作業ソフトウェアの構造共通化を図るものである。これにより，ロボットによる作業の定型化が，ロボットの作業ソフトウェアを実装する段階でも進められる。その結果として，実環境におけるロボット作業ソフトウェアの構築が容易になり，人間生活環境など，従来ロボットにとって非整備であった環境下で異機種ロボットによる作業や，異環境での作業が簡便に実現できるようになる。

ここでは，人間共存・生活支援ロボットの実現に向けた，新しい考え方である環境と作業情報の構造化について述べるとともに，現在当社が進めているロボット作業ソフトウェアの実装段階における定型化の取組み状況を述べる。

2　環境と作業情報の構造化

ロボットが実環境で目的とする作業を行う際には，環境に関する情報と作業に関する情報の両者が必要である。環境に関する情報とは，作業環境に関する情報，作業対象物体に関する情報，作業を行うロボットに関する情報である。一方，作業に関する情報には，目的達成のための作業方法などタスク（作業）レベルの情報，状況に応じた作業手順などスキル（技能）レベルの情報，ロボットを動かす制御則などサーボレベルの情報といった様々なレベルの情報が存在する。現状では，これらの情報は作業環境ごとに，またロボットごとに個別に作成されるものが多く，ほかのロボットやほかの作業環境での利用は容易ではない。

環境と作業情報の構造化の目的は，人間生活環境など従来ロボットにとって非整備であった環境下での作業，更には異機種，異環境での作業を簡便に実現できる，ロボットとインフラ共通のプラットフォーム技術を確立することである。当社は，構造化及び標準化を進めることで，ロボットによる実作業のスムーズな実現，環境や作業情報の利用価値，再利用性の向上を目指している。以下で，環境と作業情報の構造化について，具体的に述べる。

2.1　環境の構造化

環境の構造化の第一は，作業環境，作業対象物体，及び作業を行うロボットに関する各種情報（位置姿勢情報，物理パラメータなど）のデータ記述構造統一である。これにより，複数ロボット間での情報共有が容易になる。更に，作業環境内にセンサと情報を埋め込むことで，ロボットに情報提供できる環境が構築される。例えば，作業対象物体にQRコード(注1)やRFIDタグをはり付け，そこに作業対象物体に関する情報を記述しておく。そうすることで，それを扱うロボットに対して，作業実施に必要な作業対象物体のサイズや質量などの情報提供が可能となり，作業が容易に行えるようになる[2]。

第二は，環境に物理的に手を加えることである。当社と産総研は現在，人にもロボットにも扱いやすい形状の標準ハンドル（ユニバーサルハンドル）の設計を進めている。このハンドルを作業対象物体に取り付け，ロボットが対象物操作で必要とする環境情報を統一することで，人に優しい状態で，異なる作業対象物体に対する操作を同一化できる[3]。これらの環境構造化により，作業を異環境間で定型化でき，異環境での作業を簡便に実現できるようになる。

2.2　作業情報の構造化

作業情報の構造化については，構造化した環境の下で動作するロボット作業ソフトウェアの構造共通化を考え，特に，ロボットの形態（ハードウェア構成）に依存，又は非依存の観点からソフトウェアを切り分け，それらをコンポーネント化した[4], [5]。この観点でソフトウェアの切り分けを行うことで，形態が異なるロボットに同一作業を行わせることが容易になる。すなわち，形態依存部分だけ変更を行えばよくなり，形態非依存の定型部分は共通利用できる。

コンポーネント化については，産総研で開発されたロボットシステム開発のための共通プラットフォームRT-Middleware[6]（RT：Robot Technology）を採用することで標準化を図り，ロボット間での再利用を容易にした。また，構造化した環境の下で動作するロボット作業ソフトウェアの構造の一つの特徴として，CLUE（Coded Landmark for Ubiquitous Environments）[2]と呼ぶマーカを扱う標準のソフトウェアコンポーネントを用意した。CLUEは，ロボットへの情報提供用に作業対象物体内に埋め込まれ，作業実施の際には位置決めビジュアルマーカとして利用可能なQRコードで，作業対象物の情報と位置が簡単に取得できる。

このように，作業情報構造化による作業手順及びソフトウェア構造の共通・定型化で，異機種間での作業を簡便に実現できる。

3　実装レベルにおける作業情報の構造化

この章では，現在当社が取り組んでいる，ロボット作業ソフトウェアの構造の共通・定型化の実例について述べる。

3.1　ロボット作業ソフトウェアの共通化を目指した全体構造

異機種ロボット間で共通に作業動作の計画と生成が行えるロボットプログラムを，**図1**に示すシナリオ，スキル，スキルソリューション，及びサーボの4層で構成した。左から右の層へ進むにつれて，作業動作手順がロボット制御指令へと分解されていく一般的な構造である。しかし，従来各層に分散していたロボット固有の形態情報を，シナリオ・スキル層に含めないようにした点が，大きな特徴となっている。これにより，異機

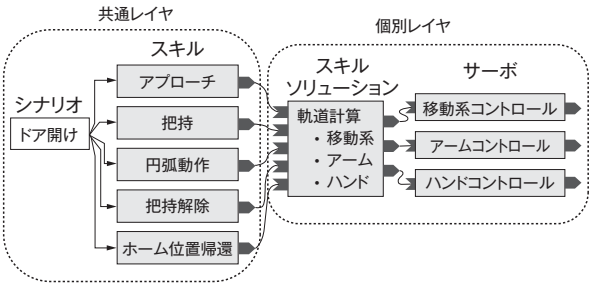


図1. ロボット動作プログラムの構成 ― ドア開け作業での例である。ロボット固有の形態情報を個別レイヤだけに含めることで，ソフトウェアモジュールの再利用性を向上した。

Configuration of robot control software

（注1）　白と黒の格子状のパターンで情報を表すマトリックス型2次元コードの一種で，（株）デンソーウェーブの登録商標。

表1. プログラム各層の実行内容と実装形態

Contents and implementation of each layer of robot control software

プログラム層	実行内容	実装形態
シナリオ	●指示された順にスキルを実行	スクリプト*2
スキル	●RMS*1からターゲットの位置・姿勢情報などを取得 ●情報を利用して手先の軌跡を計算	RTC
スキルソリューション	●手先軌跡からアームと車輪の軌道を計算 ●軌道からコマンドを生成	RTC
サーボ	●アーム，車輪，ハンドの動作コマンドを実行	RTC

＊1：Room Management System
＊2：命令実行の処理手順を記述したプログラム

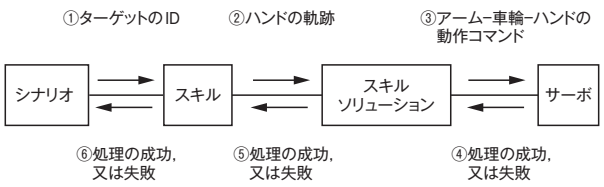


図2. プログラム各層の入出力データ — ①，②，…，⑥の順序で情報が流れる。スキル層からはロボットの形態に依存しない軌跡が出力され，スキルソリューション層でロボットの形態を考慮した軌道が生成される。

Input and output data of each software layer

種ロボットで同じシナリオとスキルが用いられるようになり，ソフトウェアモジュールの再利用性が高まった。

各層の実行内容と実装形態を**表1**に示す。スキル，スキルソリューション，サーボ層では，入力に対して決まった処理を実行することから，ほかのロボットや作業への再利用性を考え，RT-Middleware上で動作するコンポーネント（RTC：RT-Component）で実装した。また，各層の代表的な入出力データの設定を**図2**に示す。左側の上位層から表1に示した処理が順次実行され，右側の下位層へと情報が伝えられていく。

ここで，シナリオ・スキル層は，異機種ロボットで共有可能とすることを考え，ロボット固有の形態情報を含めない構成とした。そのため，ロボットが作業動作を計画し生成する際には，まず対象物操作時のハンドの動きが対象物の一般的な軌跡として算出される。その後，ロボット固有の形態情報を利用して，そのロボットに固有の軌道が生成される。したがって，スキル層が出力するハンドの軌跡は，対象物操作時のハンドの動きを，対象物との相対位置姿勢関係だけを考慮して算出したものとなっている。

生成された軌跡がそのロボットで実現可能か否かの判断は，アームの可動範囲などロボット固有の形態情報を必要とするため，スキルソリューション層で判断されることになる。これにより，異機種ロボットでのシナリオ層，スキル層の共用・定型化が可能となり，対象機種の違いはスキルソリューション層とサーボ層で吸収できる。

これらのプログラム共通化による再利用性の向上は，近年の，ロボット作業ソフトウェアの開発効率向上に対する要求の高まりを受けて取り組んだ結果である。また，RT-Middlewareを利用することで，その実装を容易にした。

3.2 サーボ層の作業情報構造化

サーボ層は，ロボットの動作プログラムの中で最下層に位置する，明確な目的を持たないロボットやハードウェアの動作を記述するプログラム層と定義される。ここでの“目的”とは，“対象物の状態を変化させる”ことである。前節において，サーボ層は，ロボット作業ソフトウェアの構造共通化を考えるうえで，ロボットの形態に依存する部分に分類された。これは，ロボット本体やそれを構成する各ハードウェアの状態チェック，及び状態制御といった，各ロボット固有のプログラムがサーボ層に含まれるからである。

しかし，サーボ層にもフィードバック制御のような，汎用的な制御プログラムが含まれる。そこで，サーボ層内部の構造を，フィードバック制御プログラムのコンポーネントで構成されるサーボレベルと，ロボットやハードウェアそのものを操作するコ

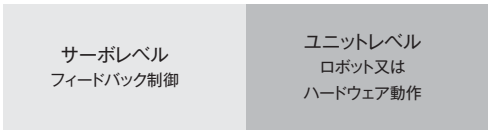
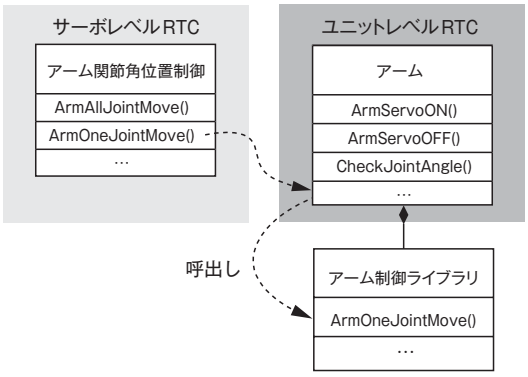


図3. サーボ層の内部構造 — サーボ層内部は，サーボレベルとユニットレベルのコンポーネントで構成される。

Internal structure of servo layer



ArmAllJointMove()　：アーム全軸動作コマンドの例
ArmOneJointMove()：アーム1軸動作コマンドの例
ArmServoON()　：アームサーボオンコマンドの例
ArmServoOFF()　：アームサーボオフコマンドの例
CheckJointAngle()　：アーム関節角度チェックコマンドの例

図4. ライブラリ単独ラッピング型の実装 — 制御ライブラリの理想的な実装形態を示す。再利用性に優れるが，リアルタイム性の確保が困難である。

Library single lapping-type implementation

ンポーネントで構成されるユニットレベルに分け（**図3**），再利用性を高めた。

サーボ層のプログラムを構成するアーム制御RTCの実装において，異機種ロボットで同一の作業を共通のソフトウェアを用いて定型的に行うには，ロボットのアクチュエータやセンサが変わってもサーボ層のRTCを再利用できることが望ましい。このため，**図4**に示すサーボレベルRTCとユニットレベルRTCを接続し，これらRTC間でフィードバックループを組む構成（ライブラリ単独ラッピング型）を考えた。この構成は，コンポーネントの再利用性に優れた理想的な実装形態である。しかし，ハードウェアの特性に応じてフィードバック制御のプログラムをRTC使用者が修正する必要が生じたり，TCP/IP（Transmission Control Protocol/Internet Protocol）を利用したRTC間データ通信ではフィードバック制御のリアルタイム性が損なわれるおそれがあるなど，実装面でいくつかの問題が生じる。

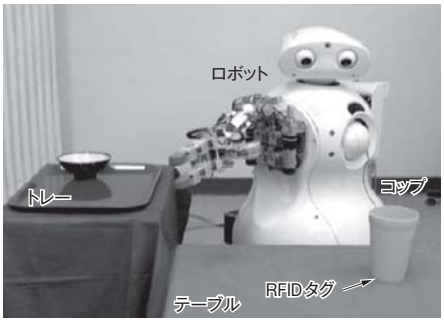


図6. 食器ハンドリングの実験システム — ロボット作業ソフトウェアの構造化を検証した。ロボット頭部に搭載したステレオ視覚システム，テーブル内に組み込んだタグ情報取得システム，及び双腕移動ロボットで構成されている。

Experimental dish-handling system

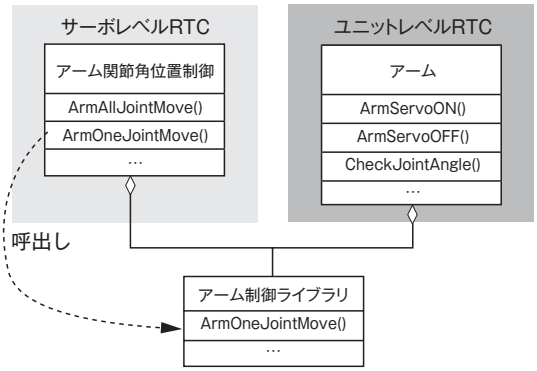


図5. シングルトン型の実装 — 制御ライブラリの現実的な実装形態を示す。リアルタイム性が確保できるが，再利用性の確保に課題がある。

Singleton-type implementation

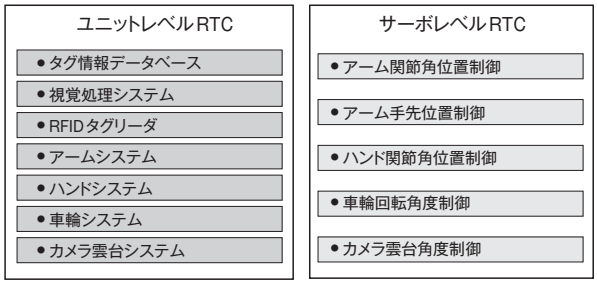


図7. サーボ層を構成する各コンポーネント — ロボットの機種に依存するユニットレベルのコンポーネントと依存しないサーボレベルのコンポーネントで構成される。

Components of servo layer

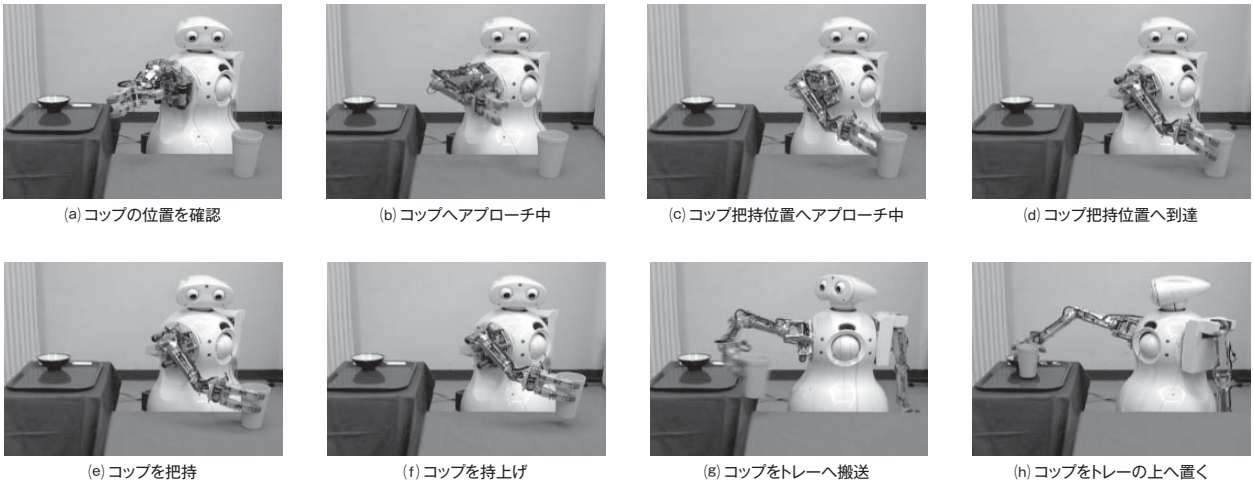


図8. 食器ハンドリング作業の実験 — タグ情報と視覚で把持対象の情報を取得し，ハンドリング動作を生成して実行している。

Dish-handling experiments

そこで，フィードバック制御に高い性能やリアルタイム性が求められる場合のために，事前にフィードバック制御のライブラリを作成しておき，フィードバック制御ではそのライブラリ関数を呼び出す構成（シングルトン型）とした（**図5**）。この構成は，コンポーネント再利用性の点ではライブラリ単独ラッピング型の構成に比べて劣るが，リアルタイム性が確保される。このため，現行のRT-Middleware上でのシステム構成に適した現実的な実装形態と言える。

これらの実装形態は，ハードウェア依存性，制御対象の粒度などを考慮して選択される。シングルトン型の現実的な実装形態に基づき，**図6**に示す食器ハンドリングシステムを構築し，システム動作検証実験を行った。このときの，サーボ層を構成する各コンポーネントを**図7**に示す。ロボットは，視覚情報とRFIDタグ情報から，把持対象の情報を取得し，アームやハンド，車輪のコンポーネントから自身の状態データを取得する。また，サーボレベルの各コンポーネントを利用して動作を行う。食器ハンドリング作業のようすを**図8**に示す。一連の作業動作の実現をもって，提案したサーボ層の構造化におけるシステムの実時間動作が確認された。

4　あとがき

人間共存・生活支援ロボットの実現に向けた，環境と作業情報の構造化の考え方と，その具体例として，現在当社が進めているロボット作業ソフトウェアの実装段階における定型化の取組みについて述べた。ロボットの形態依存，又は非依存の観点から動作プログラムを切り分けてコンポーネント化することで，再利用性とリアルタイム性を備えたコンポーネント構成を得た。

今後は，構造化した環境の下で利用できる有用なロボット作業ソフトウェアのコンポーネントの拡充を図り，各種作業が行えるロボットの早期実現に向けて努力を続けていく。

この研究は，内閣府総合科学技術会議の推進する科学技術連携施策群 次世代ロボット連携群における補完的課題として，文部科学省の科学技術振興調整費により「科学技術連携施策群の効果的・効率的な推進」の一環として実施したものである。

文　献

(1) 佐藤知正，ほか．環境の知能化と安全・安心・快適社会．日本ロボット学会誌．**25**，4，2007，p.468－489.
(2) 大原賢一，ほか．“人間とロボットの共存環境におけるビジュアルマークの提案”．第8回計測自動制御学会SI部門講演会予稿集．広島，2007-12，計測自動制御学会．1C4-2.（CD-ROM）.
(3) 菅原隆行，ほか．“ロボットの作業を支援するための物理的な環境構造化に関する研究”．第8回計測自動制御学会SI部門講演会予稿集．広島，2007-12，計測自動制御学会．1C3-5.（CD-ROM）.
(4) 大賀淳一郎，ほか．“作業構造のユニバーサルデザイン～サーボレベルの作業情報構造化”．第25回日本ロボット学会学術講演会予稿集．千葉，2007-09，日本ロボット学会．1I17.（CD-ROM）.
(5) 香月理絵，ほか．“異機種ロボット間のプログラム共通化を目指したソフトウェア構造”．第9回計測自動制御学会SI部門講演会予稿集．岐阜，2008-12，計測自動制御学会．1L2-4.（CD-ROM）.
(6) 産業技術総合研究所（RTプロジェクト事務局）．RTミドルウェアプロジェクト．<http://www.is.aist.go.jp/rt/>，（参照2008-11-11）.

吉見　　卓　YOSHIMI Takashi，Ph.D.
研究開発センター　機械・システムラボラトリー主任研究員，工博。各種ロボットシステムの研究・開発に従事。日本ロボット学会，計測自動制御学会，日本機械学会，IEEE会員。
Mechanical Systems Lab.

香月　理絵　KATSUKI Rie，Ph.D.
研究開発センター　機械・システムラボラトリー，工博。
移動マニピュレータの動作計画・制御システムの研究・開発に従事。日本ロボット学会，日本機械学会会員。
Mechanical Systems Lab.

大賀　淳一郎　OGA Jun'ichiro
研究開発センター　機械・システムラボラトリー。
マニピュレータ制御，ロボットのソフトウェアシステムに関する研究・開発に従事。日本ロボット学会会員。
Mechanical Systems Lab.