

# サーブリック分析を用いた双腕ロボットによる作業改善

## Human- Double Arm Robot Interaction for Assembly Task Based on Therblig Analysis

石井 誉仁<sup>\*1</sup> 瀧澤 雅志<sup>\*1</sup> 稲田 周平<sup>\*2</sup> 山口 高平<sup>\*2</sup>  
Takahito Ishii Masashi Fuchizawa Shuhei Inada Takahira Yamaguchi

<sup>\*1</sup> 慶應義塾大学理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Keio University  
<sup>\*2</sup> 慶應義塾大学理工学部  
Faculty of Science and Technology, Keio University

Here is discussed how to interact double arm robot with humans based on Therblig analysis in assembly task. Humans take vocabulary set related with Therblig symbols and built-in software controls double arm robot movement, specifying Therblig symbols with physical parameter set. The case study for soy sauce bottle assembly task shows us the coordination between Therblig vocabulary and physical parameter set enables Human Double Arm Robot Interaction.

### 1. はじめに

従来、産業用ロボットに動作を教示する場合、「ティーチング・プレイバック」、すなわち、人間が動作を教え(ティーチング)、ロボットがその動作を再生する(プレイバック)方式を基本原理としてきた。しかしながら、近年のセンサーの発達に応じて、エンドエフェクタ(ハンド)の先で生じている不確定事象(例えば、対象物の傾き)を認識し、「握る・掴む・挟む」などの動作を適応的に変更させる、フレキシブルなロボットの研究開発が進んできた。特に近年、専用ロボットから汎用ロボットの実現を目指して、BAXTER, NEXTAGE のような双腕ロボットの開発に関心が集まり、ロボットの HW(hardware)と SW(software) の再利用性の議論が開始されている。すなわち、工場環境を含めた組立作業内容が変化する場合、産業用ロボットで対応すれば、その変更コストは多大なものになるが、再利用性の高い双腕ロボットなら、低コストで移行できるという期待である。

以上のように、固定動作から柔軟動作に移行しつつある組立ロボットであるが、より高度な組立作業を遂行するには、人とロボットとの協調関係に基づく組立作業環境が必要であると考え、IE(Industrial Engineering)における人(作業者)の動作分析理論であるサーブリック分析を起点とし、人がサーブリック分析記号を背景にロボットに助言を与え、ロボットは詳細情報が追加されたサーブリック分析記号実行プログラムにより動作するものとし、その協調環境を構築する。

現在、通貨処理機器大手であるグローリー埼玉工場では、13台の双腕ロボット NEXTAGE が、ハードコーディングにより精緻に制御されながら、組立作業に実用化されている。しかしながら、NEXTAGE と人が互いに対話を通して相互に助け合いながらの協働作業とは言い難い。本稿では、人とロボットの協働環境が、多様な不確定環境におけるロボット作業を可能にするものと考え、まずは、サーブリック分析を境界面として、人とロボットの協働環境について考察することとした。

### 2. 組立作業における HRI

以下では本研究における双腕ロボットによる組立作業のシス

テム構成をサーブリック分析、動作プログラミングにおける属性パラメータの詳細化、語彙の関連付けによるアプローチから述べる。

#### 2.1 サーブリック分析

サーブリック分析とは、生産システム内の作業分析や作業改善を目的として、ギルプレスが考案した動作作業分析のうちのひとつである。人(作業者)の動作を基本要素(サーブリック)に分割し、それらを個別に、および他の要素と関連させながら分析し、より効率的な方法を設定する。一般的に、動作は 17 のサーブリックに分割され、それらは作業に必要なと考えられる動作の第 1 類、必要な作業を遅らせる動作の第 2 類、仕事が行われていない動作の第 3 類の 3 つのグループに分類される(表 1)。分析の主な方法としては、グループの分類や動作手順をもとに不要な動作の排除や手順変更の検討を行い、無駄の少ない効率的な作業に改善することを目的としている[藤田 78]。

本研究ではロボットを実装する際に、サーブリック分析を本来の使用法である分析手法としての使用法ではなくサーブリックという記号の動作単位の枠組みを構成的に使用して動作プログラミングを行っている。

表 1 サーブリックの分類

第1類		第2類		第3類	
記号	名称	記号	名称	記号	名称
TE	手を延ばす	SH	探す	H	保持
G	つかむ	ST	選ぶ	UD	避け得ぬ遅れ
TL	運ぶ	P	位置決め	AD	避け得る遅れ
RL	放す	PP	前置き	R	休む
I	調べる	PN	考える		
A	組合わせる				
DA	分解				
U	使用				

連絡先: 石井誉仁, 瀧澤雅志, 山口高平, 稲田周平  
慶應義塾大学理工学部  
〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1  
TEL:045-566-1614  
{tk.1218.tk@z2, ma-ftzw@z7}.keio.jp,  
yamaguti@ae.keio.ac.jp  
inada@mwa.biglobe.ne.jp

## 2.2 サブリッグ記号の実行

ロボットで作業を実行するためには組込みソフトウェアでロボットを制御する必要がある。そこで本研究では 2.2 で説明したサブリッグ分析の記号理論を基に、ロボットが作業をする上で必要となる TE(手を伸ばす), G(つかむ), PP(前置き), TL(運ぶ), A(組み合わせ), RL(放す)の6つの動作要素に焦点を当て、ロボット用に動作要素を変更し、作業が実行できる状態まで落とし込んだ。そして、汎用性を持たせた組立動作を実現すること、アームによる制約・対象物による制約を考えたうえで必要となる属性パラメータを最適化して基本動作を宣言的に実装した(表2)。これにより、組立作業の対象が変更された場合でも属性パラメータの変更によって記号の意味の範囲内で不確実な環境で対応し得る動作を実行することを可能にした。よって、この属性パラメータを自律的決定することができれば作業を自動で行うことができるということに通じると言える。

表2 記号と属性パラメータ

記号	パラメータ
TE	対象物 近づけ方 持ち手 速さ
TE2	目的座標 持ち手 速さ
G	指先の間隔 持ち手 速さ
PP	手の向き 持ち手 速さ
TL	目的位置 近づけ方 持ち手 移動速さ 近づけ時速さ
TL2	目的座標 持ち手 速さ
SC	回し込む向き 回転量 つかみ方 放し方 持ち手 速さ 回数
RL	指先の間隔 持ち手 速さ

TE2, TL2 は TE, TL 動作時に発生する障害物からの会費動作を表す動作要素である。人間の作業では TE などの動作を行う際に、手や持っているものが他のものにぶつかからないように手を動かしている。つまり、手を目的の場所に運ぶ動作と障害物から避ける動作を同時に行っていることになる。そこで、障害物から避ける動作を目的の場所に手を伸ばす動作の準備動作としてとらえ、TE2, TL2 として定義することにした。A の動作は「置く」「押し込む」「回し込む」など動きの違う複数の作業内容に分けられるため、動きが決まっている他の記号で動作を表すことにした。しかし「回し込む」動作を他の記号で動作を表そうとした場合、「ものを回す」「ものを放す」「回した手を元に戻す」「ものを再びつかむ」という流れを何度も表現することになるため煩雑になってしまい、改善の検討がしにくくなってしまふ。そのため「回し込む」動作は SC という一つの動作として定義した。また、人間の作業における TE では手を伸ばす際に目的物に対して手の向きを合わせる動作を同時に行っているが、ロボットの作業においてはこの動作は PP で表し、TE は手の座標移動のみを表す動作とした。

次に、属性パラメータの値について TE の記号を例にとりて詳しく説明する。TE は手を対象物へ伸ばす動作であるが、ロボットに TE を実行させる場合には記号の意味が分かっているだけでなく、人間と同様に簡単に対象物に手を伸ばすことができない。そこで、サブリッグ記号をロボットが理解できるまでブレイクダウンすることが必要となってくる。今回は人が作業をする際に無意識に行っている動作に必要な情報から、必要な属性パラメータとして、対象物の位置情報、持ち手の判別、伸ばす経路、移動の速さをロボットが理解できる数値や文字列として用意して、その属性パラメータ情報から適切な動作を選択し、人が意味する TE という記号と同じ意味でロボットが動くように構築している(図1)。

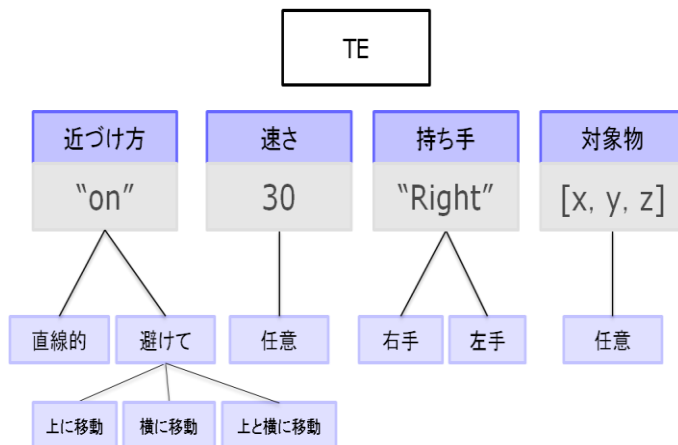


図1 TEの属性と値

## 2.3 サブリッグ記号の関連語彙

ロボットが作業をする際には、動作を計画することが動作をおこなう前段階で必要になってくる。本研究では、その部分を人に代わってもらうために対話のモジュールと修正モジュールを構築した。ここでは、対話のモジュールと作業を修正するモジュールとに関して説明する。

対話モジュールでは 2.2 で述べた属性パラメータのそれぞれに対して語彙セットを用意して語彙セットと属性パラメータをリンクすることで人間の世界の言葉とロボットが理解できる動作を対応付けて対話と動作の連携を実現した(表3)。この対応表は、属性パラメータを変化させるために人が対話で伝えるべき情報であり、例えば持ち方において「横から近づけて」と対話した場合に横からつかむ動作をロボットが判断できるようになっている。

表3 属性パラメータと語彙の対応表(一部)

TE		語彙	直接	上に避けて	横に避けて	上と横に避けて
近づけ方	語彙					
	パラメータ	"direct"	"on"	"side"	"on_side"	
持ち方	語彙	横から	上から	正面から		
	パラメータ	"side"	"on"	"front"		
速さ	語彙	早く	普通	遅く		
	パラメータ	50	30	10		

次に、対話モジュールによって対応づけられた言葉から動作を修正するモジュールを実装した。修正モジュールはロボットが作業をした結果を人が見て、その失敗原因を言葉による教示から動作内容変更する処理をする。これは記号の属性パラメータに対して対話フローを用意して、対話を通じて記号における属性パラメータの値を特定し、特定した箇所を変更することで可能にしている(図2)。フローを用意したことによって対話における人の曖昧な言葉の表現を抑制する役割と、「どの部分を」や「どのように」といった修正部分を明確にすることができ、ロボットが理解できる言葉で対話することを担っている。そして、教示の方法は人が対応付けた語彙を直接話すことによって成り立っている。例として TE において持ち方を変化させたい場合は、人が「持ち方を変えて」とロボットに伝えると、対応付けられた語彙からフローによって持ち方の可能動作である「横から」、「正面から」、「上から」の選択肢をロボットが列挙し、人が選択肢から可能動作を

選択して話すことで変更したい箇所をロボットに伝えることで変更箇所の特性と変更をする。

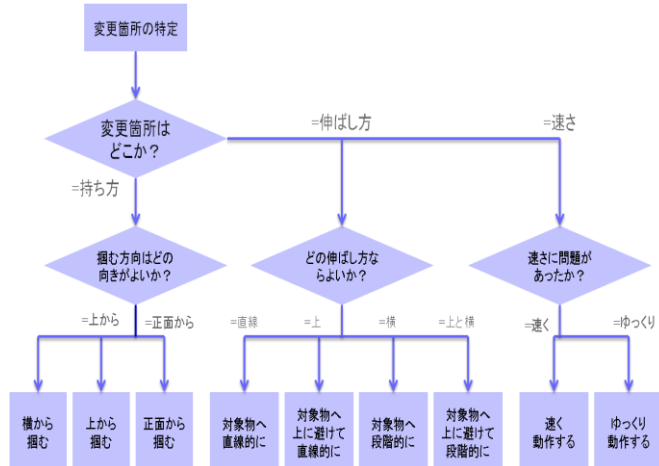


図2 TEにおける修正フロー(一部)

また、本研究では作業を修正する際のティーチングのタイミングに関して、1つの記号が終わった段階で修正するオンライン処理を採用している。オンライン処理の場合は、記号の1単位が終了した段階で、ティーチングを行うことによって失敗箇所が複数あったとしても、1つずつ解決していけるので失敗箇所の特定を容易にし、修正のトータル時間もバッチ処理に比べて短くなる理由からである。また、人にとってもタスクを細かくセグメントしているので失敗原因の特定の際の負担が軽減するといったメリットもある。逆にバッチ処理の場合は、対話による教示の方法が非常に曖昧な表現になるのと、オンライン処理よりも作業の修正に時間がかかってしまうために今回は採用しなかった。

### 3. ケーススタディ

#### 3.1 使用ロボット

本研究で使用したロボットについて説明する。システム上では、人型ロボットと双腕上半身ロボットを連携して使用することで組立作業を実現する。人型ロボットとしては、当研究室で対話と動作を融合したHRI(Human-Robot interaction)を実現する研究として使用されているロボットである Aldebaran 社製 NAO を用いており、特徴としては人間らしい動作や対話能力があるという点で優れていると言える[Kobayashi 11]。また、双腕上半身型ロボットは川田工業製の HIRONX を用いており、HIRONX の最大の特徴は大型のアームとグripperを備えているので、NAO とは対照的に実世界のハンドリングの能力に優れているという点である。本研究では用いていないが、ステレオカメラ、ハンドカメラを搭載しており、画像処理を加えた制御も可能である。

これら2台の用途の異なるロボットの特徴を活かしてソケットによって2台のロボットを連携して組立タスクを実現する。

#### 3.2 実験環境

本研究では、2章で述べてきたようにサーブリックを構造的に利用して基本となる動作を宣言的に構築し、音声対応によって人と協調的に作業ができるように組立作業ロボットを実装した。ケーススタディとして、構築したシステムを利用して、ロボットが一般的なユーザと協力して簡単な組立作業として醤油差しを組み立てるサービスを行う(図3)。

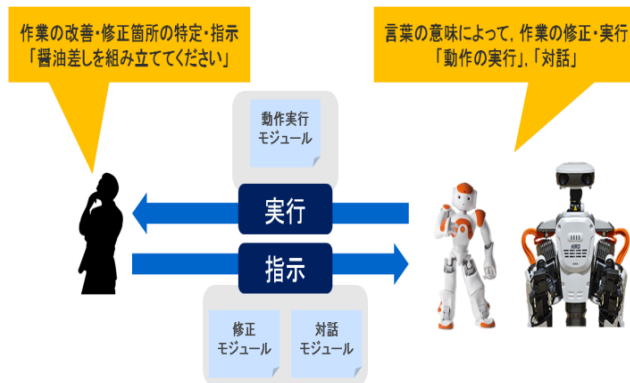


図3 ケーススタディシナリオ

#### 3.3 ケーススタディ

下記に、実験シナリオの醤油差しにおける組立作業の中から、人が協力的に作業指示をして作業を変更する流れを示す。また、会話文における処理は既存研究の対話モデルと音声インターフェースを使用しており、形態素処理と定型文パターンによる自然言語処理によって対話を実現している。表3の対応表にある語彙を人が発言した内容を形態素処理し、対応する語彙があった場合に目的の発言や処理をするようになっている。つまり、ロボットが尋ねた質問に対して答えられるパターンは限られており、汎用的な会話はできない。例えば、手を延ばす動作を修正する際には、「持ち方」や「伸ばし方」などが含まれる言葉には対応することができるが、「もう少し右に動かして」のような会話はできないのでロボットの質問に対して適切な返答する必要がある。

ユーザ)はユーザの発話、NAO)は NAO の発話、HIRO)は HIRONX の作業を示す。

NAO) HIRO に何を組み立ててもらおう?  
 ユーザ) 醤油差しを組み立てて。

<<HIRONX に作業内容の命令を送信し、組立内容の作業を実行>>

HIRO) 醤油差しの筒に対して左手で上から掴もうとする

<<記号の1単位が実行完了したことをNAOに送信>>

NAO) HIRO はちゃんと作業できた?  
 ユーザ) できてないよ。

NAO) HIRO の作業のどこを直せばよい?  
 ユーザ) 持ち方を直して。

NAO) 持ち方には「上から」、「横から」、「正面から」があるよ。どれに変更する?

ユーザ) 横からにして。

<<修正モジュールから作業内容の変更箇所を特定し、目的の変更内容へとパラメータを変更>>

HIRO) 作業内容を変更した動作を実行し、醤油差しを横から掴む。



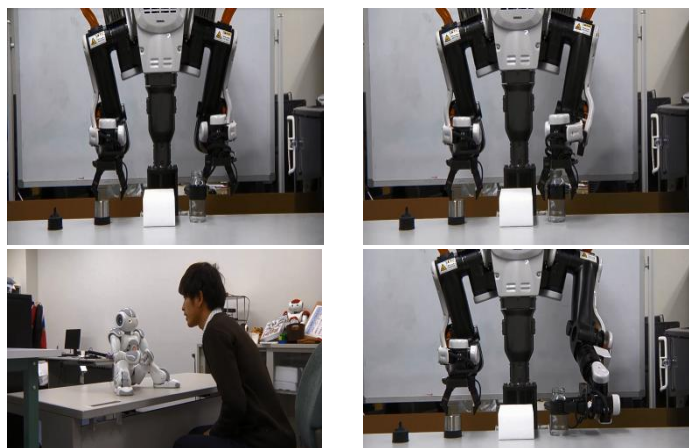


図 4 HIRONX の作業修正への展開

次に左手で醤油差しの筒を掴む一方で右手が動作していないので右手も同時に動かすように作業を修正する流れを示す。

**HIRO)** 左手で筒を横から掴む。

<<HIRONX の 1 記号単位が終了したこと命令を NAO に送信  
>>

**NAO)** HIRO はちゃんと作業をできた?

**ユーザ)** できてないよ

**NAO)** どの部分を直す?

**ユーザ)** 両手作業にして。

**NAO)** 了解。

<< 修正モジュールから作業内容の変更箇所を特定し、目的の変更内容へ満たすパラメータを変更 >>

**HIRO)** 作業内容を変更した動作を実行し、両手同時に作業を行う。

<<HIRONX 両手同時の作業を実行し、組立作業を完了する  
>>

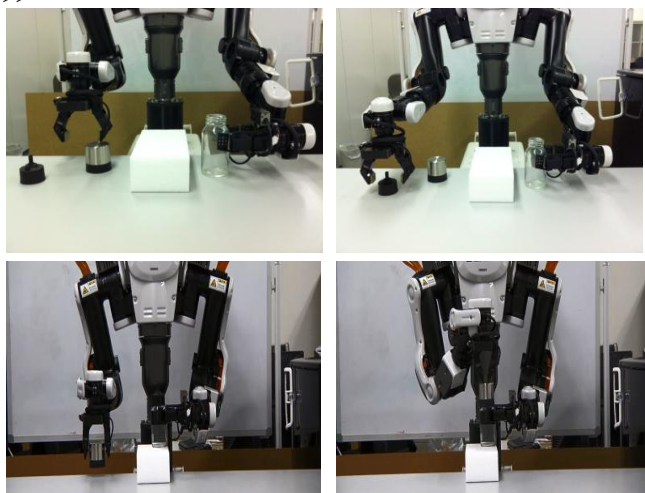


図 5 HIRONX の両手作業への展開

#### 4. おわりに

本稿では、IE(Industrial Engineering)におけるサーブリックを利用して、詳細情報が追加されたサーブリック分析記号実行プ

ログラムによりロボットが動作する環境を構築したもとの、組立作業を人と協調的に行うシステムを構築を試みた。ここでは、サーブリック分析を構成的に用いて実装に組み込み、対話モデルと音声インターフェースの既存研究を利用することで、ユーザとロボット間における協調から組立作業を行うことを実現している。また、その延長線として、サーブリック分析の本来の利用方法である作業改善を、ロボットと人間の対話を介して行い、作業の時間を短縮縮小することが可能であることも確認した。

本研究で提案したシステムは、ティーチング・プレイバックよりも実世界という不完全な環境に柔軟に対応できる再利用性が高いシステムと考えられ、人とロボットのインタラクションを通じて協調的に作業を実行する有意性が示せたと言える。

今後の課題としては、記号内における暗黙的な動作要素の検討や「人による教示」から「ロボットからの教示」を実現することもあげられる。また、画像処理技術を利用したパラメータの決定による半自律的な組立作業の実現やタスクにおける作業手順の計画と組立作業の改善の自動化などをもすることも双腕ロボットがよりフレキシブルに作業を実現するために必要であると考えられる。最後に、本研究は組立作業という 1 つのタスクとして取り上げたが、当研究室では SOA に基づく異機種ロボット連携を検討しているので、本研究も SOA 内で検討して組立作業を含めたロボット連携サービスを検討していく予定である[樋川 14]。

#### 参考文献

[Kobayashi 11] Shotaro Kobayashi, Susumu Tamagawa, Takeshi Morita and Takahira Yamaguchi: Intelligent Humanoid Robot with Japanese Wikipedia Ontology and Robot Action Ontology, HRI2011 (6th International Conference on Human-Robot Interaction), pp. 417-424 (2011).

[藤田 78] 藤田彰久, "新版 IE の基礎", 建帛社.

[樋川 14] 樋川 暁, 小川 雄平, 森 雄一郎, 山口 高平, "オントロジーと SOA に基づくロボット協調サービスシステムの構築", 人工知能学会全国大会(2014), 4J1-3.