

解 説

World Robot Summit 2018 ものづくりカテゴリー競技 「製品組立チャレンジ」の概要

“Assembly Challenge”, a Robot Competition of the Industrial Robotics Category, World Robot Summit 2018

横小路 泰 義^{*1} 河 井 良 浩^{*2} 柴 田 瑞 穂^{*3} 相 山 康 道^{*4}
琴 坂 信 哉^{*5} 植 村 渉^{*6} 野 田 哲 男^{*7}
土 橋 宏 規^{*8} 阪 口 健^{*2} 横 井 一 仁^{*2}

^{*1}神戸大学 ^{*2}産業技術総合研究所 ^{*3}近畿大学 ^{*4}筑波大学 ^{*5}埼玉大学 ^{*6}龍谷大学 ^{*7}大阪工業大学 ^{*8}和歌山大学
Yasuyoshi Yokokohji^{*1}, Yoshihiro Kawai^{*2}, Mizuho Shibata^{*3}, Yasumichi Aiyama^{*4}, Shinya Kotosaka^{*5}, Wataru Uemura^{*6},
Akio Noda^{*7}, Hiroki Dobashi^{*8}, Takeshi Sakaguchi^{*2} and Kazuhito Yokoi^{*2}
^{*1}Kobe University ^{*2}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology ^{*3}Kindai University ^{*4}University of Tsukuba
^{*5}Saitama University ^{*6}Ryukoku University ^{*7}Osaka Institute of Technology ^{*8}Wakayama University

1. は じ め に

World Robot Summit (WRS) [1] は、経済産業省と NEDO が主催するロボットの競演会であり、2015 年策定の「ロボット新戦略」に基づき、人間とロボットが共生し協働する世界の実現を念頭に世界のロボットの叡智を集めて、リアルな日々の生活、社会、産業分野でのロボットの社会実装と研究開発を加速させることを目的としている。WRS はオリンピックイヤーである 2020 年に本大会が開催される予定であるが、2018 年 10 月 17 日～21 日にかけて東京ビックサイトにて東京大会がプレ大会という位置づけで開催された。

WRS は、ロボットの競技会「World Robot Challenge」と、最新のロボット技術を展示する「World Robot Expo」で構成され、競技会は「ものづくり」、「サービス」、「インフラ・災害対応」、「ジュニア」の四つのカテゴリーがある。その中でもものづくりカテゴリーでは次世代生産システムの開発を促進するために「迅速な一品ものづくりを目指して」という目標を掲げ、「製品組立チャレンジ」というロボット競技会を実施することとなっている。筆者らは、WRS ものづくり競技委員会の主要メンバーとして、製品組立チャレンジの競技設計を行ってきた。本稿では、ものづくりカテゴリーが何を目標しているかを述べた後、競技ルールの

詳細および 2018 年 10 月に東京で開催されたプレ大会の結果を紹介し、最後に WRS2020 本大会に向けての展望を述べる。なお、WRS の実施決定までの経緯やものづくり分野の背景、2017 年に行われた製品組立チャレンジのトライアル競技のルール詳細については、文献 [2] に詳しいので参照されたい。

2. 製品組立チャレンジの競技設計の経緯

2.1 基本課題設定

産業用ロボットが「半完結製品」と言われる理由は、ロボット導入にかかるコスト全体の中でロボット本体のコストは約 20～30% であり、周辺装置や周辺機器のコストに加え、それらを一つのシステムとして組み合わせるシステムインテグレーションに 50% 以上のコストがかかるためである [3]。大量生産の時代には、導入時に手間とコストが多少かかったとしても、一旦システムとして組み上がった後複数年に渡ってそのまま使い続けることで導入コストがペイできた。しかし、このような成り立ちのシステムでは昨今の消費者ニーズの多様化や製品ライフサイクルの短縮化に伴う変種変量生産の要求にはなかなか応えることができず、人によるセル生産方式（人セル）が登場することになった。またこのように導入コストが高く、新たな生産要求にも融通が利かないこと、運用に相応の専門知識が必要なことが、中小企業においてロボット導入が進まない大きな理由である。

ロボットが行う作業の中でも組立作業はパーツフィーダや治具などの周辺機器の準備に手間とコストがかかり、精密なはめ合わせには注意深い指示が必要な上、導入直後に頻発しがちな「チョコ停」をつぶすための指示軌道の微調整にも多くの手間と時間を要する。また柔軟な部品の場合には、そもそも指示再生ではうまく組み立てることができず、ロボット化自体が進んでいないのが現状である。そこで WRS ものづくりカテゴリーでは、数ある作業の中から製品組立を競技会の課題に設定することにした。

製品組立の競技を設計をするうえで、我々はまず基本課題を設定することとした。上記の背景に加え、欧米の文献 [4] [5] も参考にしながら、これからのものづくり分野のロボットに求められるのは、新たな生産要求にも迅速にかつスリム

原稿受付 2019 年 1 月 18 日

キーワード: Assembly, Cell Production System, Robotic Competition, Agile and Lean Manufacturing

^{*1}〒657-8051 神戸市灘区六甲台町 1-1

^{*2}〒305-8560 つくば市梅園 1-1-1

^{*3}〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1

^{*4}〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1

^{*5}〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

^{*6}〒520-2194 大津市瀬田大江町横谷 1-5

^{*7}〒581-0867 大阪市北区茶屋町 1-45

^{*8}〒640-8510 和歌山市栄谷 930

^{*1}Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo

^{*2}Tsukuba-shi, Ibaraki

^{*3}Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima

^{*4}Tsukuba-shi, Ibaraki

^{*5}Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama

^{*6}Otsu-shi, Shiga

^{*7}Kita-ku, Osaka-shi, Osaka

^{*8}Wakayama-shi, Wakayama

表 1 次世代生産システムのレベル表（ドラフト版）

	段取り替え時の指標		稼働時の指標	備考
	Agility (迅速性)	Leanness (機器の再利用率)	稼働率の向上	
レベル 5	新規製品対応 0 Day (当日段取り替え)	100%継続利用 (複数製品の治具レス組立 を可能とする汎用ハンドの 導入など)	学習機能(チョコ停防止, タ クトタイム向上) 完全自動復帰(大停止も)	究極の目標 自律行動計画など
レベル 4	新規製品対応 2 Days (週末段取り替え or 一泊 出張)	既存機器の組替えのみで新 製品に対応(複数部品把持 可能な汎用ハンドなど)	チョコ停自動復帰(人間介 入動作の観察学習など) 大停止は人間介入	WRS で目指すレベル 少数の汎用ハンド
レベル 3	新規製品対応 1 Week (1 週間かけて段取り替え, 大型連休中)	50%以上が再利用可能(専 用ハンドライブラリ, フレ キシブル治具, 複雑構成な どを活用)	稼働率改善(チョコ停防止 策など)提案の自動化	オフライン動作計画, 複雑 などによる専用治具低減
レベル 2	新規製品対応 1 Month	ロボットのみ再利用	センサによる, 部品ばらつ きの吸収によるチョコ停率 低減	今の技術で可能なレベル
レベル 1	特定製品専用 (段取り替えを想定してい ない)	0% (再利用は想定しない)	部品ばらつきをコントロ ールして稼働率を確保, チョ コ停は人が介入	現在日本国内で稼働中の多 くのロボットシステム

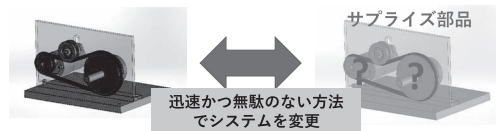
2017年トライアル@IROS2017: ギヤユニット組立/タスクボード



技術的チャレンジ

- ・クリアランスの小さい部
品のはめ合い
- ・対象部品の認識
- ・治具を使わない組立

2018年東京大会: ベルトドライブユニット(+サプライズ部品)組立



(上記に加えての)

- 技術的チャレンジ
- ・柔軟部品・透明部品
- ・3 部品同時組立
- ・微細部品(例: M3ネジ)
- ・サプライズ部品への迅速
な対応

2020年本大会: 後日確定(さらに難易度の高い製品+サプライズ製品?の組立)

図 1 「製品組立チャレンジ」の競技内容の変遷

に無駄なく対応できること, すなわち Agility と Leanness であるとした. これを受け, 表 1 に示すような次世代生産システムのレベル表[†]も作成し, WRS が目指すべき方向を明確化した.

以上のように目指すべき方向を明確化したうえで, 競技会の形態としては, 与えられた製品情報からすぐさま動作手順を自動生成し, 柔軟部品を含む様々な部品の認識, 把持, 組立ができるロボットシステム, 究極的には教示レス, 治具レスで段取り替えを素早く行って, たとえ一品物であっても効率的に組立が可能なロボットシステムを目指して, その性能を競うこととし, 競技名は「製品組立チャレンジ」とした. また競技が目指す方向性を“Toward agile one-off manufacturing (迅速な一品ものづくりを目指して)”と分かりやすく一言で表現した.

2.2 競技内容の変遷

2018 年のプレ大会に先立ち, ものづくりカテゴリーでは 2017 年 10 月に IROS での 2nd Robotic Grasping and Manipulation Competition [6] の一競技としてギヤユニットの組立をトライアル競技として実施した. トライアル競技については文献 [2] に詳しいのでここでは省略する. ま

たトライアル競技の後に, 同年 12 月に東京ビックサイトで開催された国際ロボット展の NEDO ブース内でデモ競技を行った.

製品組立チャレンジは, まったく新しいロボット競技種目であったため, トライアル競技によってルール策定や競技審判について多くを学ぶことができた. またデモ競技では, 競技会の演出方法や観客の安全性確保について多くの知見を得ることができ, これらは 2018 年のプレ大会の競技を設計するうえで貴重な経験となった.

図 1 に, 製品組立チャレンジの競技内容の変遷を示す. 2018 年のプレ大会の競技ルールは次章で詳しく述べる.

3. WRS2018 製品組立チャレンジの競技設計

3.1 競技タスクの概要

2018 年プレ大会の競技ルールの設計に際しては, まず組立対象となる製品の検討を行った. トライアル競技のために設計したギヤユニットよりも難易度の高い製品として, 新たにベルトドライブユニットを考案した. ギヤユニットと比較してベルトドライブユニットが難しいポイントとしては, (i) 部品点数が多く, M3 イモネジなどの非常に小さな部品が含まれており, (ii) 柔軟部品としてベルトがあり, (iii) ギヤユニットと違って組み付け方向が常に鉛直ではなく, (iv) 一つの部品を把持しながら別の部品を組み付ける

[†]生産システムである以上, 稼働時の効率(リードタイム)も重要であることに変わりはない. ただしその重要度は段取り替えの頻度が増すにつれて, 相対的に低下するであろう.

表 2 競技日程

2018 年 10 月							
15 日	16 日	17 日	18 日	19 日	20 日	21 日	22 日
セットアップ期間		Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	ポスト競技会企画
非公開		一般公開期間					非公開
チーム セットアップ		製品組立チャレンジ				エキシビション, 表彰式	シンポジウム
				組立			
システムセットアップ, 調整, 安全検査		タスクボード	キッティング	サブライズ 部品なし	サブライズ 部品あり		

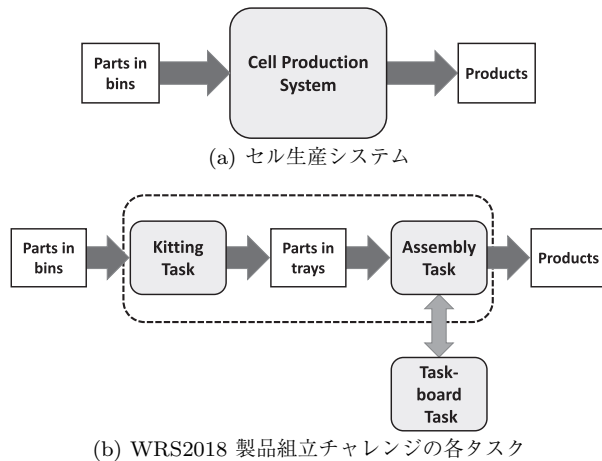


図 2 セル生産システムと WRS2018 製品組立チャレンジの各タスクとの関係

など双腕を必要とする組み付け工程が含まれる, といった点がある[†]. また詳細は後述するが, ベルトドライブユニットの構成部品の一部を競技の直前に初めて開示するサブライズ部品とし, 新たな生産要求にいかん迅速 (agile) かつスリムに無駄なく (lean) 対応できるかを競うこととした.

新たな製品の組立要求にも迅速に応えることのできるロボットシステムの理想形は, やはりセル生産方式であろう. 現在の人セルでは, 図 2 (a) に示すように, 基本は一人の人間が部品箱から必要な部品を取り出して製品を組み立てていく. この人セルのロボット化を競技会でいきなり要求するのは難易度が高すぎると判断し, 図 2 (b) に示すように, 組立の前段階としてキッティングを行い, 組立はキッティングされた部品から行うこととした. また NIST の Van Wyk らが構想・開発し, IROS 2nd Robotic Grasping and Manipulation Competition で導入されたタスクボード [7] にヒントを得, ベルトドライブユニットの組立の要素を抜き出したタスクボードを作成し, 競技の一種目とすることとした.

ベルトドライブユニットに限らず, 一般に製品を組み立てるためには, 工程を一つ一つ積み上げていく必要があり,

ある工程を完了しなければ, その次の工程には進めず製品が完成できない. 一方タスクボードでは, 必要な工程がすべて分解されているので, ポイントの積み上げがしやすい. またタスクボードの個々の工程をこなすことが, ベルトドライブユニットの組立にもつながるので, 導入的な競技種目として適していると考えた.

以下では, まず競技日程と競技フィールドの説明をしたのち, 「タスクボード」, 「キッティング」, 「組立」のそれぞれのタスクのルールについて詳しく述べることにする. なお, 競技ルールの詳細については文献 [8] を参照されたい.

3.2 競技日程

表 2 に, 競技日程を示す^{††}. 参加チームは, 10 月 15 日から競技会場への立ち入りが許可され, ロボットシステムのセットアップと調整を 2 日間かけて行う. ロボットシステムのセットアップが完了すると, 安全衛生監視団による安全検査を受け, この検査にパスしなければ競技会に出場することができない.

10 月 17 日から会場は一般公開され, 競技会が始まる. 競技は Day 4 で終了し, Day 5 は上位入賞チームによるエキシビションを行う. 22 日は, 非公開でのシンポジウムを開催し, チームからのフィードバックを受けたり, 2020 年本大会に向けた競技会のありかたを議論することとした.

3.3 競技フィールド

図 3 (a) にものづくりカテゴリーの競技フィールドの 1 単位となるアリーナの斜視図を示す. 図に示すように, アリーナは四つのチームエリアが集まったものであり, 各チームエリアは, ロボットなどのシステムが稼働するシステム稼働エリアと, チームメンバーがロボット動作プログラムを開発したり競技中は動作を監視できるオペレーションエリアから構成される. 図 3 (b) に実際の競技フィールドの概観を示す. 競技会場には A から D の四つのアリーナが設営され, 計 16 チーム分のチームエリアがあることになる.

競技会では各アリーナから 1 チームずつ, 計 4 チームが同時に競技を行い, 順次 4 チームごとに競技を進めていく.

3.4 競技ルール

3.4.1 タスクボード

タスクボードは, ベルトドライブユニットの組立タスクで要求される要素作業から 14 の作業を抽出し, 400 × 400 [mm] のボード上に集約したものであり, NIST のタスクボード [7] を参考にして作られた.

[†] 図 1 には技術課題の一つとして「透明部品」が挙げられている. 透明部品は画像認識が難しく, 柔軟部品と並んでロボットによる組立が困難であるため, 当初はベルトドライブユニットのカバーとして導入を計画していたが, 製作コストの問題から断念した.

^{††} この表はチームに関係する部分のみであり, 競技会場の設営は 10 月 13 日から開始されている.

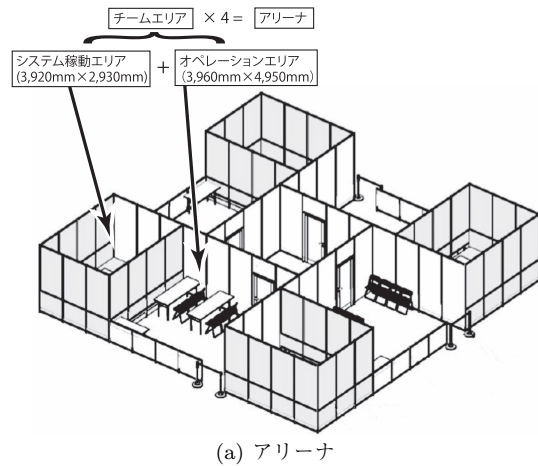


図3 競技フィールド

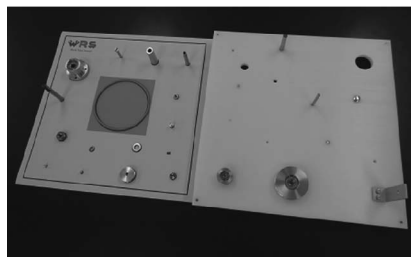


図4 タスクボード

競技時間は20分であり、Day 1に各チーム2回競技を行い、得点の高い方が採用される。図4にタスクボードの外観を示す。図4(a)に配置マット上の指定場所に部品が配置された初期状態を示す。配置マット上の部品の配置レイアウトは事前には知らされておらず、競技開始10分前に初めて示される。これにより事前の教示による部品のPickingを防いでいる。競技開始直後は準備フェーズとなり、チームメンバーは、システム稼働エリア内にタスクボードと配置マットを設置し、配置マット上に部品を配置する。準備

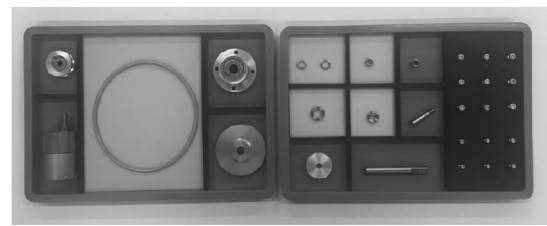


図5 キッティング

が完了すればオペレーションフェーズに移行し、ロボットがタスクボードに部品を組み付けていく。リセットは何度でも可能だが、リセットするたびに初期状態に戻す必要があり、その間も競技時間は進行する。

タスクボードの配点は100ポイントであり、条件を満たせば後述するタイムボーナスが別途加算される。

3.4.2 キッティング

キッティングタスクおよび組立タスクのために図5(a)に示すような部品トレイを開発した。ベルトドライブユニットの部品のうち、15種の部品がトレイ上に配置される。ベースプレートなどのプレート状部品は大柄なので、トレイ上には配置しない。部品トレイはあえて二つに分け、参加チームが自ら使用するロボットの動作範囲を考慮して自由にトレイを配置できるようにした。

競技設計当初は、図2(b)に示したように、チームがキッティングしたものをそのまま後段の組立に使うという案もあった。この場合、キッティングが不完全だと、その後の組立も完遂できないことになり、プレ大会としては競技の難易度が高くなりすぎる懸念があった。また15個の部品箱と2枚の部品トレイをロボットの動作範囲内にうまく配置するのも、部品棚などの工夫が必要となり、やはりプレ大会としてはチームの負担が大きくなると判断した。

そこでキッティングタスクとしては、15種の部品のうち競技委員会が選定した10種の部品のみを対象とし、その中から10個の部品をキッティングする作業を1セットとし、1競技で合計3セットのキッティングを行うこととした。競技時間は20分であり、Day 2に各チーム2回競技

を行い、得点の高いほうが採用される。

図 5(b) (c) に 10 種の部品箱および完成したセットの例を示す。図 5(c) に示すように、オーダーされる 10 個の部品は一部同じ種類の部品である場合もある。このため、10 種類の部品からでも異なった 3 種のセットがオーダーされるようになっている。

3 セット分の部品のリストは電子ファイルで競技開始 10 分前にチームに配布される。これと同時に対応する部品の入った 10 種の部品箱と 3 セット分の空の部品トレイも支給されるが、システム稼働エリアへの部品箱と部品トレイの設置は、競技開始後の準備フェーズで行う。システム稼働エリア内の部品箱と部品トレイの配置はチームの自由である。

キッティングの配点は、1 セット 50 ポイント満点で、合計で 150 ポイントである。また条件を満たせば後述するタイムボーナスが別途加算される。50 ポイントの内訳は、部分点の合計が 20 ポイント、セットが完成すると完成ボーナスとして 30 ポイントが加算される。これは本来キッティングは完全なキッティングがなされないと意味がないという点を考慮したものである。キッティングされた部品トレイは、システム稼働エリアからチームメンバーにより搬出され、所定の場所に置かれたもののみが採点対象となる。リセットは何度でも可能であるが、リセットするたびに現在処理中のオーダーを初期状態に戻してやり直す必要があり、その間も競技時間は進行する。

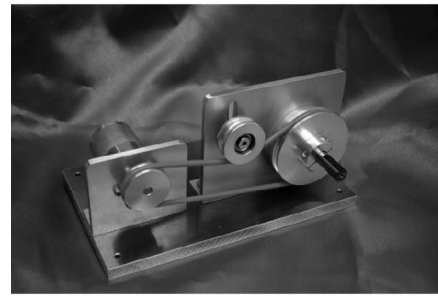
3.4.3 組立

組立対象製品であるベルトドライブユニットの外観と分解図を図 6 に示す。ベルトドライブユニットは、19 種類、計 33 個の部品で構成され、あらかじめ完全にキッティングされた部品トレイから組み立てる。

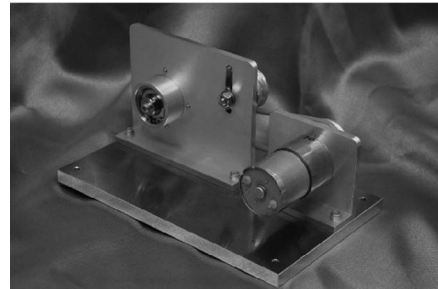
Day 3 では、30 分の競技時間内に事前に部品情報を公開済みのノーマルユニットを 2 台組み立てる競技を 2 回行い、得点の高いほうが採用される。Day 4 では、60 分の競技時間内にノーマルユニット 2 台と競技会期中に開示されたサブライズ部品を含むユニット 1 台の合計 3 台を組み立てる。Day 4 の競技は各チーム 1 回のみである。

キッティングされた部品トレイは、競技開始 10 分前に支給されるが、システム稼働エリアへの部品トレイの設置は、競技開始後の準備フェーズで行う。サブライズ部品に関する情報開示は、当初 CAD モデルなどの電子情報が競技開始 60 分前、実際の部品は競技開始 10 分前としていたが、サブライズ部品への対応への時間的猶予を与えるため、実際には電子情報を競技開始 19 時間前に開示し、実部品は競技開始 2 時間前に支給することとした。

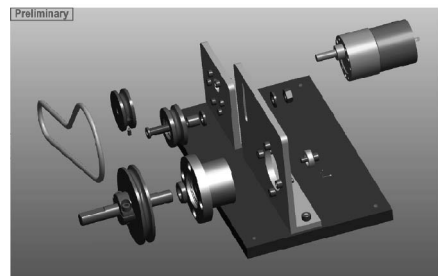
Day 3 のポイントは、最大 100 ポイントであり、条件を満たせば後述するタイムボーナスが別途加算される。100 ポイントの内訳は、ユニット 1 台の組立に 45 ポイント (×2) に加え、Agility&Leanness 評価 (Day 3 では主に技術評



(a) 外観 1



(b) 外観 2



(c) 分解図

図 6 ベルトドライブユニット

価) が 10 ポイントある。ユニット 1 台の組立 45 ポイントの内訳は、A から H の八つのサブタスク[†]のポイント合計が 31 ポイント、完成した製品の評価に 14 ポイントである。

Day 4 のポイントは、最大 200 ポイントであり、条件を満たせば後述するタイムボーナスが別途加算される。200 ポイントの内訳は、ユニット 1 台の組立に 45 ポイント (×3) に加え、Agility&Leanness 評価 (Day 4 では技術評価に加え、段取り替え時間とサブライズ部品達成度を評価) が最大 65 ポイントある。Day 3, Day 4 と組み立てられたベルトドライブユニット (またはサブタスクを完了した半完成品) は、システム稼働エリアからチームメンバーにより搬出され、所定の場所に置かれたもののみが採点対象となる。リセットは何度でも可能であるが、リセットのたびに現在取り掛かっているサブタスクのうち最低一つのサブタスクを初期状態に戻す必要があり、その間も競技時間は進行する。

また Day 4 では、サブライズ部品を含むユニットをあるレベル以上完成させないと、二つめのノーマルユニットのポイントが無効となる。これは、サブライズ部品を含むユニットの組立への迅速な段取り替えを要求している Day 4 の競技において、ノーマルユニット 2 台のみを完成させてポイントを稼ぐ戦略を阻止するための対策である。

[†]サブタスクとは、ベルトドライブユニットの組立工程を大きく八つに分け、サブタスクを完了することで部分点を与えるようにしたものである。詳しくはルールブック [8] を参照いただきたい。

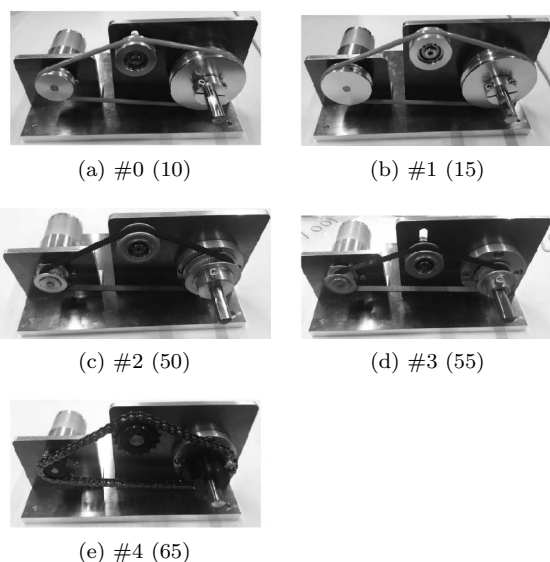


図 7 サプライズ部品を含む 5 種のベルトドライブユニット (カッコ内は難易度に応じた Agility&Leanness 評価の傾斜配点)

表 3 各タスクの配点

Day	タスク	配点	備考
Day 1	タスクボード (20 分 × 2 トライ)	100	2 トライのうち得点の高い方 タイムボーナス (最大 50 ポイント) は別途加算
Day 2	キッティング (20 分 × 2 トライ)	150	2 トライのうち得点の高い方 タイムボーナス (最大 50 ポイント) は別途加算
Day 3	アセンブリ (サプライズなし) (30 分 × 2 トライ)	100	2 トライのうち得点の高い方 タイムボーナス (最大 50 ポイント) は別途加算
Day 4	アセンブリ (サプライズあり) (60 分 × 1 トライ)	200	タイムボーナス (最大 100 ポイント) は別途加算
合計		550	

図 7 に、サプライズ部品を含む 5 種類のベルトドライブユニットを示す。図に示すように、サプライズ部品の難易度に応じて、Agility&Leanness 評価が傾斜配点される。サプライズ部品は用意できる数が限られているので、Day 3 までの得点順に各チームから選択させることとした[†]。

3.5 タイムボーナス

表 3 に各タスクの配点と合計ポイントを示す。各タスクとも一定の条件を満たした場合のみ、残り時間 20 秒ごとに 1 ポイントをタイムボーナス (上限あり) として加算する。

タスクボードでは、最大 50 ポイントまで加算する。これは競技開始後 3 分 20 秒でタスクボードを完成させることに相当する。キッティングでも、最大 50 ポイントまで加算する。これは 1 セットあたり 1 分 7 秒で 3 セットを完成させることに相当する。アセンブリでは、Day 3 は最大 50 ポイントまで加算し、これは 1 ユニットあたり 6 分 40 秒で 2 台完成させることに相当する。Day 4 は最大 100 ポイントまで加算し、これは 1 ユニットあたり 8 分 53 秒で 3

台 (そのうち 1 台はサプライズ部品あり) を完成させることに相当する^{††}。

3.6 安全衛生

本競技会において安全衛生は最も重要なことである。産業用ロボットをはじめ本競技会で用いる機器には、適切な安全対策を講じておかなければ大きなリスクとなり得る。よってものづくりカテゴリーでは「安全衛生ファースト」の基本原則のもとに様々な方策を講じ、参加チームにも安全衛生の遵守を義務づけた。

まず「完全分離の原則」に基づき、競技に用いられている物品そのものまたは物品からの飛散物と、参加者との間の物理接触により発生する事故を防止するため、競技システムが作動しているシステム稼働エリアとそれ以外の空間を安全柵で分離した。これは、昨今の協働ロボットのように安全柵を取り払う方向と逆行するように見られるかもしれないが、「模擬工場」とみなせるのはチームエリア内のみであり、本質安全を確保するために、一般の観客が居るエリアとは完全分離させることは必要と考えた。また競技ルール上オペレーションフェーズでの人とロボットの協働は許されていないので、システム稼働中はシステム稼働エリアを安全柵で完全分離することに問題はない。

参加チームには、安全柵のドアスイッチや非常停止ボタン、表示灯等を含む安全回路が支給され、競技会場でのシステムセットアップ時に競技システムと安全回路を適切に接続しなければならない。また参加チームは ISO 10218 シリーズとその上位規格に準拠し、チームエリア (模擬工場) のリスクアセスメントを実施し、競技会前にアセスメント結果を競技委員会に提出しなければならない。またセットアップ後には安全検査を受検し、改善要求があれば対応して、安全検査にパスしなければ競技会には参加できない。

競技会開催中も、安全衛生監視団は安全衛生パトロールを実施し、安全衛生上の懸念に対して是正措置勧告や競技の停止、安全規定の遵守の勧告、参加の中止の指示などが行えるとした。

4. WRS2018 製品組立チャレンジのチーム選考から競技結果まで

4.1 参加チーム

製品組立チャレンジのプレ大会での参加チーム枠は 16 としたが、この枠を超える応募が国内外からあり、提出書類に基づいた選考により、国内 8 チーム、海外 8 チームの 16 チームを選出し、2018 年 5 月に通知した。国内チームは、大学の研究室のチームや企業との連合チーム、SIer のチームなど多彩な顔ぶれとなり、海外チームも北米、中国、東南アジア、ヨーロッパと世界各国からの参加となった。表 4 に参加チームのチーム名とアリーナ配置を、得点と総合順位とともに示している。また、図 8 に各チームの得点内訳を示す。

4.2 ロボット貸し出しとサンプル部品

製品組立チャレンジでは、産業用ロボットもしくはそれに準ずるロボットマニピュレータが必要であり、参加を検

[†]実際の競技会では、やさしいものを選んで堅実にポイントを稼ぐ戦略のチームや、高難度のものを選んで逆転を狙うチームなど、戦略の違いがみられた。

^{††}後述するように結局 WRS2018 では、タスクの完遂を条件に付与されるタイムボーナスを獲得したチームは皆無であった。

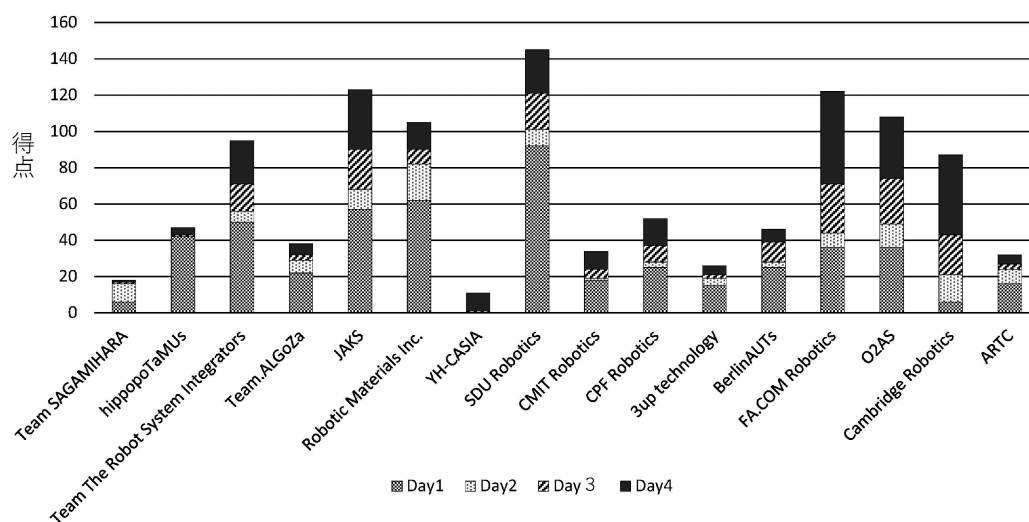


図 8 各チームの得点内訳

表 4 得点と総合順位

アリーナ	チーム	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Total	順位
A-1	Team SAGAMIHARA	6	10	1	1	18	15
A-2	hippopoTaMUs	42	0	1	4	47	9
A-3	Team The Robot System Integrators	50	6	15	24	95	6
A-4	Team.ALGoZa	22	7	3	6	38	11
B-1	JAKS	57	11	22	33	123	2
B-2	Robotic Materials Inc.	62	20	8	15	105	5
B-3	YH-CASIA	0	0	0	11	11	16
B-4	SDU Robotics	92	9	20	24	145	1
C-1	CMIT Robotics	18	1	5	10	34	12
C-2	CPF Robotics	25	3	9	15	52	8
C-3	3up technology	15	4	2	5	26	14
C-4	BerlinAUTs	25	3	11	7	46	10
D-1	FA.COM Robotics	36	8	27	51	122	3
D-2	O2AS	36	13	25	34	108	4
D-3	Cambridge Robotics	6	15	22	44	87	7
D-4	ARTC	16	8	3	5	32	13

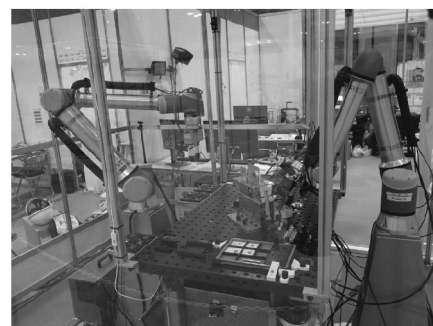


図 9 SDU Robotics

討するチームにとってはハードルの高い競技会であることは否めない。そこでものづくり競技委員会では、WRSのグローバルパートナーでもあるロボットメーカー4社のご協力のもと、WRS-LLP（有限責任事業連合）から産業用ロボット2台（5[kg]可搬，700[mm]リーチ）を希望チームに貸し出す仕組みを整えた。その結果，選考した16チームのうち国内から6チーム，海外から3チームの貸し出し希望があり，希望チームすべてに産業用ロボットを貸し出すことができた。

また2017年のトライアル競技のときから，サンプル部品を事前に参加チームに送付していたが，今回もそれを踏襲し，全参加チームにタスクボード，キッティング，組立のタスクに使用する部品サンプルを事前に送付した[†]。

4.3 競技結果と考察

4.3.1 タスクボード

タスクボードは，ベルトドライブユニットの要素作業を抜き出して個別に行えるようにしたものであるので，競技委員会としては満点チームが多く出ることを期待していたが，実

際の結果はSDU Robotics（図9参照）がほぼ満点となった以外はほかのチームは振るわなかった。恐らくその原因は，実際に競技で使ったタスクボードのレイアウトを事前に公開していたものからわずかに変更したことによるものと思われる^{††}。ルールにもタスクボードのレイアウト変更はあり得ると明記していたが，ほとんどのチームにとって配置マットのレイアウト変更は織り込み済みであったものの，タスクボードのレイアウト変更は想定していなかったようである。このタスクボードのレイアウト変更はある意味サプライズとなり，このレイアウト変更にいかに対応できたかが，明暗を分けることとなった。

SDU Roboticsは，2回目のトライにおいて唯一ワッシャ1枚の組み付けを失敗した以外はすべての組み付けを成功させ，タイムボーナスは逃したもののタスクボードで最高得点を獲得した。彼らは把持する部品に応じて爪先のみを交換できるハンドを導入していた。

Robotic Materials Inc.は，ほかのチームの多くが複数のアームで競技を行うなか，1本のアームと単一の2指汎用ハンドのできる作業をすべてこなし，高得点を上げたことが印象に残った（図12(a)参照）。

4.3.2 キッティング

キッティングは，150ポイント満点の競技であったにもかかわらず，最高得点でも20ポイントと，どのチームも振るわなかった。

[†] トライアル競技で使ったギヤユニットと同様，参加チームが部品を容易に追加入手でき，また競技会後には皆がベンチマークとしても使えるよう，部品はなるべく世界各国に販売サイトがあるMISUMI Group Inc.から入手できるものとした。

^{††} レイアウト変更後のタスクボードの図面は，セットアップを開始する10月15日にはチームに開示していた。

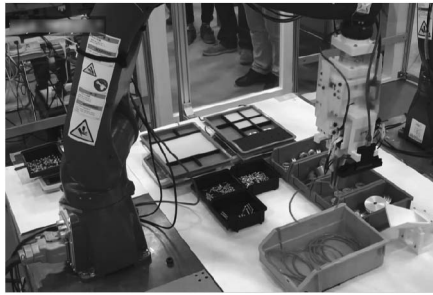
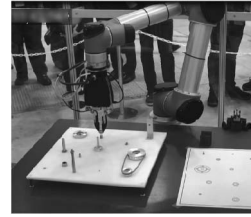
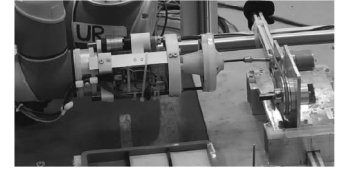


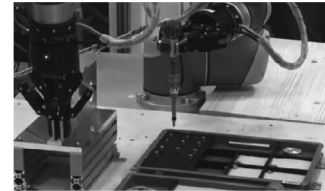
図 10 JAKS



(a) Robotic Materials Inc.

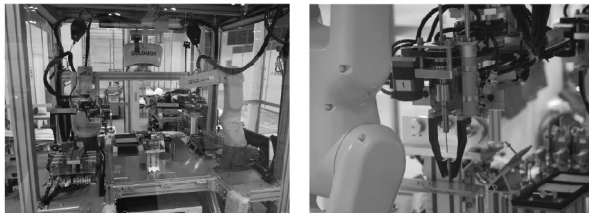


(b) Cambridge Robotics



(c) O2AS

図 12 上位 3 位のチーム以外の注目チームの例



(a) システム概観



(b) ハンド

図 11 FA.COM Robotics

多くのチームが部品の認識に苦労したようであり、準備したセンサが不調のチームもあったようである。また前日のタスクボードの競技を終えてからキッティング競技開始までの限られた時間内で、キッティングに対応するシステムへの段取り替えが十分にできていなかったチームも見受けられた。

そのような状況下で、すべてのチームがセット完成を目指さず、ポイントが取れる部品のピッキングだけを行う戦略を取ったようであり、競技を設計した側としては残念な結果となった。

キッティングで注目すべきチームとしては、触覚センサを活用してベルトを確実に 1 本だけ把持していた JAKS (図 10 参照)、タスクボードに引き続き単腕で挑戦し、認識がうまくいかないと部品箱をロボットでつかんで揺らす戦略を取っていた Robotic Materials Inc.、独自のスコップ状のエンドエフェクタでネジをすくって向きをそろえていた SDU Robotics、粘土状のエンドエフェクタで異形部品をくっつけて拾い上げる戦略を取っていた Cambridge Robotics などが挙げられる。

4.3.3 組立

Day 3 では、どのチームもベルトドライブユニットを完成させることができず、できる範囲のサブタスクだけを行って搬出させていた。

Day 4 でも、ほとんどのチームが 1 台目のノーマルユニットをできる範囲のサブタスクだけを行って搬出させ、2 台目のサプライズ部品を含むユニットでもサプライズ部品には手を付けられずに終わるところが多かった。

その中で、FA.COM Robotics (図 11 参照) は 1 台目のノーマルユニットを、リセットを何回も繰り返しながらも

表 5 学会賞受賞チーム

日本ロボット学会特別賞	Cambridge Robotics
人工知能学会賞	SDU Robotics
日本機械学会会長賞	Robotic Materials Inc.
計測自動制御学会賞	O2AS

根気よく組立を続け、競技開始から 53 分でユニットを見事完成させ、製品チェックもパスして 1 ユニットでの満点の 45 ポイントを獲得した[†]。その後 2 台目のユニットでサブタスクのポイントを加算し、Day 3 に引き続いて Day 4 でも組立タスクの最高ポイントを獲得した。

FA.COM Robotics が開発したドライバ内蔵ハンドは、ネジの把持から締結までが非常にスムーズに行え、2 本指ながら爪先に複数の切り欠きを施すことで、ハンド交換することなく複数の部品を把持できる工夫がされており、注目すべきハンドである (図 11 (b) 参照)。

また Cambridge Robotics は、Day 4 で唯一最高難易度のサプライズ部品 #4 を選択し、制限時間ぎりぎりまで果敢に挑戦していたのが印象的であった。彼らはキッティングタスクでの粘土状エンドエフェクタに引き続き、組立タスクにおいてもネジの Picking やエンドキャップの脱落防止にグリースを使用するというほかでは思いつかないアイデアを披露してくれた (図 12 (b) 参照)^{††}。一方 O2AS は、ハンドで把持可能な小型の電動/空気圧ツールを開発し、把持姿勢を変えることで様々な方向から対象にアプローチできるようにしていた (図 12 (c) 参照)。

19 時間前に開示されたサプライズ部品の CAD データを有効に活用したチームとして SDU Robotics がある。彼らはサプライズ部品であるタイミングベルトプーリーの模型を 3D プリンタで製作するとともに、その部品を把持するためのハンドの爪先を 3D プリンタで製作した。そして実際のサプライズ部品が支給される前に、サプライズ部品の模型によって、製作した爪がうまく機能するかを検証していたようである。

4.4 安全衛生

各チームの事前のリスクアセスメントに関しては概ね良

[†]FA.COM Robotics は Day 5 のエキシビションにおいては、約 16 分でノーマルユニットを完成させている。

^{††}部品にグリースを付着させたことは、ルール上は部品の汚損に相当するため、残念ながら減点対象となった。

好であったが、「協働ロボットなので安全性は担保されている」という誤った認識をもっていたチームもあった。競技前の安全検査も、一部チームで再検査を要したものの、最終的に全チームが合格した。競技会期中は、残念ながら監視団が看過できない重要なインシデントが数件発生した。その中には「完全分離」の原則を揺るがしかねないものや製品の安全規格の認識不足に起因するものが含まれている。

このように、安全衛生については課題が残ったが、安全監視団の尽力により競技会は安全に実施され、競技会を通じてチームの安全意識が向上したのも事実である。

4.5 WRS2018 製品組立チャレンジの総括

表4に各タスクのポイントとポイント合計、総合順位を示す。また表5に、ものづくりカテゴリーで学会賞を受賞したチームを示す。総合優勝はSDU Roboticsであり、タスクボードのポイントで総合順位がほぼ決まった感がある(図8参照)。タスクボードでは、競技会直前のレイアウト変更に対して多くのチームがその対応に苦慮し、図らずも今回の競技会でのサプライズの役割を果たしたといえる。キッキングでは、センサの不調もあり、競技設計側が期待した結果を出したチームは皆無であった。アセンブリでは、Day 4でFA.COM Roboticsのみがベルトドライブユニットを完成させたのが印象的であった。ただし完成させたのはノーマルユニットであり、Day 4は本来サプライズ部品に対応すべき日であったことは忘れてはならない。

以上のように、WRS2018のものづくりカテゴリーの競技「製品組立チャレンジ」は、5日間の会期を無事終えることができた。550ポイントが満点の競技において、総合優勝チームでさえも満点の30%にも満たない得点であったことから、競技の難易度が高すぎたとみる向きもあろう。しかし、“Toward agile one-off manufacturing”という目標に向かうには、競技会で課せられたタスクを完了できる程度の技術が必要なことは、何よりも参加したチームが認識しているのではないだろうか。実際、競技会後のシンポジウムでも、今回の競技会を終えて多くのチームが設定課題の難しさを実感しつつも2020年本大会参加に意欲を示してくれた。

また本稿では触れなかったが、成績の振るわなかったチームにおいてさえも、時としてメンバーの悔し涙や歓声があり、産業用ロボットを用いた本格的な競技会の場合、人材育成という面でも大きな役割を果たしたといえる。さらに競技会後も、ベルトドライブユニット組立をはじめとする各タスクとその競技結果が、各所で開発されるロボットシステムの性能を同じ土俵で評価する一種のベンチマークとして活用されることも期待できる。この意味で、「製品組立チャレンジ」という過去にない競技会を作り上げた今回のWRS2018は、競技会としては成功したといえるのではないだろうか。

5. WRS2020 に向けての展望（おわりに代えて）

本稿では、WRS2018のものづくりカテゴリーの競技「製品組立チャレンジ」の概要と競技会の結果について述べた。誌面の都合もあり競技結果の紹介はごく簡単なものとなつてしまったので、競技結果の詳細な解析については別の機会に譲りたい。

WRS2020本大会においても、ものづくりカテゴリーの競技として製品組立チャレンジを実施できるかは、主催者の正式なアナウンスを待つ必要があるが、本稿を終えるにあたりWRS2020に向けての展望を述べたい。

WRSの競技会の設計で注意しなければならない点は、次世代のロボット技術開発を加速させる競技会とするべきであつて、決して競技会のための競技となつてはならないという点である。WRS2018の製品組立チャレンジの競技ルールにおいても、実際の生産現場では想定しにくい設定になつてしまった点があつたことは否定できない。競技会として成立させるためには、ある程度仕方がないところもあるが、本来の競技会の趣旨からも、また参加チームからの賛同を得るためにも、この点は忘れてはならない。

この視点で課題となる点をいくつか最後に議論したい。今回の競技会では、最近注目されている人とロボットとの「協働」は排除した。これは安全性確保の理由もさることながら、ものづくり競技委員会では、現在の協働ロボットのトレンドは、現状ではロボット化できない作業を人間で行わせる「現実解」に過ぎず、将来の目標はやはり完全自動であるという立場を取ったからである。しかしながら、特に欧州の研究者らと議論すると、彼らはこの「協働」を人の働く機会の確保やいわゆるクラフトマンシップによる高付加価値などの観点から捉えており、単なる効率追求を超えた視点であることにも気づかされる。またIndustrie 4.0[9]に代表されるIoT/IIoTやCPSのものづくり分野への適用という課題も、プレ大会では明示的には示せていなかった[†]。このトレンドは、競技設計側が意識せずとも参加チームが自然と導入していくことかもしれないが、例えば観客からカスタム製品の仮想注文をスマホ等から受け付け、注文された製品データからシステムの段取り替えを行って、いかに迅速にその注文に応えられるかを競うというのも、実現性は高くないかもしれないが、競技会としては面白いかもしれない。

以上の議論を踏まえ、ものづくり競技委員会では“Toward agile one-off manufacturing”という目標を引き続き掲げて、WRS2020における競技設計を進める所存である。

謝 辞 本稿を終えるにあたり、WRS2018のものづくりカテゴリーの「製品組立チャレンジ」の競技設計・運営にご協力いただいた関係者各位、特に審判員や安全監視員として競技会実施に多大なるご協力をいただいた方々に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] World Robot Summit, <http://worldrobotsummit.org/>. Accessed Jan. 6, 2019.

[†]逆に、ネット越しでの遠隔操作などの不正防止のために、競技中はチームのシステムをインターネットから遮断するという、「つながる工場」とは逆行する措置をとらざるを得なかった。一方で、SDU Roboticsがサプライズ部品の爪を3Dプリンタで製作したことは、CPSのコンセプトの具現化の一例といえる。

- [2] 横小路泰義, 横井一仁: “World Robot Summit 製品組立チャレンジ”, 計測と制御, vol.56, no.10, pp.798–804, 2017.
- [3] NEDO: NEDO ロボット白書 2014. 2014.
- [4] H. I. Christensen et al.: “Next Generation Robotics,” A Computing Community Consortium (CCC) white paper, 2016, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1606/1606.09205.pdf>. Accessed Aug. 15, 2017.
- [5] Robotics 2020 Multi-Annual Roadmap - For Robotics in Europe, Horizon 2020 Call ICT-2016 (ICT-25 & ICT-26), 2015, https://www.eu-robotics.net/cms/upload/downloads/ppp-documents/Multi-Annual_Roadmap2020_ICT-24_Rev_B_full.pdf. Accessed Aug. 15, 2017.
- [6] 2nd Robotic Grasping and Manipulation Competition, http://www.rhgm.org/activities/competition_2017/. Accessed Jan. 6, 2019.
- [7] K.V. Wyk, J. Falco and E. Messina: “Robotic Grasping and Manipulation Competition: Future Tasks to Support the Development of Assembly Robotics,” In: Yu Sun, Joe Falco (eds) Robotic Grasping and Manipulation. RGMC 2016. Communications in Computer and Information Science, vol.816, Springer, Cham, 2018.
- [8] Industrial Robotics Category, Assembly Challenge, Rules and Regulations 2018, http://worldrobotsummit.org/download/rulebook-en/rulebook-Assembly_Challenge.pdf. Accessed Jan. 6, 2019.
- [9] Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>. Accessed Jan. 6, 2019.



横小路泰義 (Yasuyoshi Yokokohji)

1988 年京都大学大学院博士課程中途退学。同年に京都大学工学部オートメーション研究施設助手。1992 年機械工学教室助教, 2007 年機械理工学専攻准教授を経て 2009 年より神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻教授。博士 (工学)。日本機械学会, 計測自動制御学会のフェロー。システム制御情報学会, 日本バーチャルリアリティ学会, IEEE などの会員。WRS 実行委員, WRS ものづくり競技委員長。

(日本ロボット学会正会員・フェロー)



柴田瑞穂 (Mizuho Shibata)

2006 年立命館大学大学院理工学研究科単位取得退学, 2007 年立命館大学理工学部助手, 2008 年立命館大学理工学部助教, 2011 年近畿大学工学部講師を経て, 2018 年より同准教授。博士 (工学)。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE の会員。WRS ものづくり競技委員。

(日本ロボット学会正会員)



琴坂信哉 (Shinya Kotosaka)

1996 年埼玉大学大学院博士 (工学) 取得, 理化学研究所奨励研究員, (株) ATR 人間情報通信研究所滞在研究員, 科学技術振興事業団川人学習動態脳プロジェクト研究員を経て, 現在埼玉大学大学院理工学研究科人間支援・生産科学部門所属, 准教授。ロボットの産業応用, ロボット安全, 適応的なロボットの運動軌道生成の研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会会員, WRS 実行委員, WRS ものづくり競技委員。

(日本ロボット学会正会員・フェロー)



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。2017 年より大阪工業大学ロボティクス&デザイン工学部ロボット工学科。日本ロボット学会論文賞, 功労賞ほかを受賞。博士 (工学)。システム制御情報学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE の会員。WRS ものづくり競技委員。

(日本ロボット学会正会員)



阪口 健 (Takeshi Sakaguchi)

1993 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所, 2001 年の独立行政法人化を経て, 現在国立研究開発法人産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。日本機械学会, 計測自動制御学会の会員。1994 年ロボット学会研究奨励賞受賞。WRS ものづくり競技委員。

(日本ロボット学会正会員)



河井良浩 (Yoshihiro Kawai)

1989 年名古屋大学大学院博士課程前期課程情報工学専攻修了。同年通産省工業技術院電子技術総合研究所入所。現在産業技術総合研究所知能システム研究部門研究部門長。博士 (情報科学)。電子情報通信学会, 情報処理学会などの会員。WRS ものづくり競技副委員長。

(日本ロボット学会正会員)



相山康道 (Yasumichi Aiyama)

1995 年東京大学大学院博士課程修了。同年に東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助手。1999 年筑波大学機能工学系講師, 2004 年助教授, 2007 年准教授を経て 2015 年より筑波大学システム情報系教授。博士 (工学)。日本機械学会, IEEE, 日本ロボット工業会, 自動化推進協会などの会員。WRS ものづくり競技委員。

(日本ロボット学会正会員)



植村 渉 (Wataru Uemura)

2005 年大阪市立大学大学院工学研究科電子情報系専攻博士課程修了。同年龍谷大学理工学部助手。助教を経て, 現在同講師。博士 (工学)。2009 年計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 奨励賞受賞。人工知能学会, 電子情報通信学会, IEEE などの会員, WRS ものづくり競技委員。



土橋宏規 (Hiroki Dobashi)

2012 年京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻博士課程修了。同年関西学院大学理工学部契約助手。2013 年立命館大学理工学部助教。2017 年和歌山大学システム工学部講師となり現在に至る。京都大学博士 (工学)。2011 年度計測自動制御学会学術奨励賞, 2012 年日本ロボット学会研究奨励賞, 2016 年度システム制御情報学会論文賞などを受賞。計測自動制御学会, IEEE などの会員。WRS ものづくり競技委員。

(日本ロボット学会正会員)



横井一仁 (Kazuhito Yokoi)

1986 年東京工業大学大学院機械物理工学専攻修了。同年工業技術院機械技術研究所に入所。2001 年産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。2015 年同所情報・人間工学領域知能システム研究部門長, 2017 年同所同領域研究戦略部長, 現在に至る。日本機械学会フェロー, IEEE などの会員。博士 (工学)。WRS 実行委員, WRS ものづくり競技委員 (前実行委員長)。

(日本ロボット学会正会員)