

力触覚伝達型遠隔操作システムと AI を連携 ロボット自律化に新手法

大手山 亮・廣木 正行

近年、生産施設の建設事業においては、建屋や建築設備のみならず生産ラインやその運用方法を考慮したトータルな計画・設計施工を手掛けている。顧客と共に生産施設の企画・計画検討を進めていく中で、多く挙げられる課題が第一に「人手不足」、次いで「技能伝承」である。

そこで2016年に課題解決のアプローチとして、現在の生産現場における「労働集約型作業」から「インターネットを利用した高効率作業＝労働力集約型作業」への変革を目指した検討を開始した。その際に用いるコアテクノロジーは、力触覚伝達および遠隔操作に関する技術である。

翌2017年にはスタートアップ企業との協業により「力触覚伝達型遠隔操作システム」のプロトタイプを開発し、技術面での成果項目と課題を洗い出した。2018年には異業種の協業企業も増やし、産業向けの汎用ロボットや国際規格に準拠した制御システム等の導入により、生産現場を意識した構成に進歩させた。さらに2019年2月にはAI（人工知能）を連携させることにより、人間の遠隔操作データから産業用ロボットを精度良く自律動作させることにも成功した。

本稿ではその開発の経緯や成果を紹介する。

キーワード：人工知能, ロボット, IoT, 5G, 力触覚, スタートアップ, 人手不足, 技能伝承

1. はじめに

近年、日本国内では全般的に労働者不足が深刻化してきている。建設業のみならず一般製造業やサービス業などでも人手不足の課題があり、誰もがその影響を身近に感じられる状況となっている。

建設事業の対象は多岐にわたるが、モノづくりをする「生産施設」や「工場」を手がけることもある。一般の建物において建設事業の主体となるのは建屋や建築設備の計画・設計・施工であるが、「生産施設」においては、製造室内の製造ライン、生産運用の設計を実施した上で全体プランを作成することや、生産機器を組み合わせる製造ラインそのものの実装と試運転まで手がける「エンジニアリング」が必要となる。

「生産施設」や「工場」建設の初期段階からプロジェクトに参画し、エンジニアリングを進めていく過程では、建物の使われ方、つまり製品の生産方法までも深いレベルで顧客と課題を共有することになる。さらに生産性と効率を高めることを目指した生産施設の建設プロジェクトを数多く実施することで、自ずと生産施設共通の「難題」を見出すこともできる。

例えば、医薬品・化粧品・食品という、いわゆる「三品産業」と呼ばれる業界の顧客からは工場生産にかか

わる「人手不足」や「技能伝承の課題」に関する声を多く聞く。

一般的に三品産業の生産施設においては、すでに専用の加工装置や自動搬送装置、自動包装装置や検査設備などを組み合わせて自動化された生産ラインが多く、の工程に導入されている。

その一方で、単純であるが扱うものが多様であったり、一定の熟練度（技能）が要求されたりする作業は、いわば人手に頼らなければならない「労働集約型の単純作業」として工場内に依然存在し、自動化の対象からとり残されているのが現状である。

例えば、原料の計量や品質管理部門などで、多様な物性の液体を様々な量に小分けする計量作業や、数日おきに生産する品種が変わるような少量多品種生産ライン、また、製品単価が安く、頻繁に新製品の生産を行う大量生産ラインなどでは、多くの作業員を集めて手作業による作業を続けている。しかも、その作業は清浄度の高い空間で行われている場合や、危険な性状の物質を扱う工程である場合もある。

工場運営側にとっては、このような単純な工程はできるだけ自動化し、作業安全の確保とコストの最適化を図りたいと考えるのは自然なことである。

一方、自動化が進まない最も大きな要因は「多様な

作業内容」と「一定の熟練度」に対応する自動化装置の開発にある。開発にはコスト面だけでなく開発に従事する人的リソースの面でも大きな負担を生じ、まさに「チカラ技」による開発となってしまう。

実際には、単純な工程と言いながらも作業員は自らの視覚や触覚などの五感を駆使して複雑な状況を観察し、判断と決断を繰り返しながら作業を行っている。また、時間をかけて習熟すれば作業が巧みになり、「技」と呼べるレベルに到達する。

「労働集約型の単純作業」の自動化を達成するためには、その「技」をつぶさに観察し、動作プログラムとして言語化してコンピュータに記述することが必要となる。さらに、その作業に適したハードウェア（センサーやロボット）の探索も必要である。当然、設計・製作・試運転まで長期間を要する壮大なプロジェクトとなり、これが「チカラ技」の所以である。

このような背景から、「労働集約型の単純作業」が工場からなくなることはなかった。

さらに時代は変化し、最近では作業員が集まらない、技の伝承にも時間がかげられない、「チカラ技」もかけられない。実はこれが「難題」の本質である。

2. 「力触覚伝達型遠隔操作システム」のコンセプト

そこで「多様な作業内容」のみならず、「一定の熟練度」に対応できる省力化・自動化ソリューションとして、2016年に「力触覚伝達型遠隔操作システム」のコンセプトを考案した。

これは操作側のロボットと遠隔側のロボットがインターネット等を介して動作が連動する構成となっている。特徴的な点は、ロボットのハンド部分にモノを掴んだり離したりする際の「力加減」を検知するデバイスを搭載し、人間の感覚に近い遠隔操作を行うことにある。

このシステムが実現すると、作業員は遠隔地から現場作業に従事することが可能になる。つまり生産現場に人を集める従来型の「労働集約型作業」から、時間と場所の概念を超えて労働力のみを集約する「労働力集約型作業」への転換が実現する。また、双方向伝達される力触覚を含んだ熟練作業の遠隔操作データを蓄積して技能伝承にも利活用するだけでなく、AIによる学習も期待できる。

3. 「人間の五感」とその双方向情報伝達技術

開発したシステムの説明をする前に、ここではコア



図一1 「人間の五感」と、その双方向性情報伝達技術

テクノロジーの一つである人間の五感とその情報双方向性について簡単に解説する。

図一1に示すように聴覚や視覚の双方向性は、既に我々の生活の中で利用されており、巨大な産業を形成している。電話やテレビ会議などがその例である。

また、触覚による一方向性の情報伝達は「ハプティクス」技術として確立しており、携帯電話の着信を振動で人に知らせる、車のハンドルを振動させて運転者に白線検知を知らせる機能などで、広く一般に利用されている。

触覚情報の「双方向性」という観点になると身近な利用例は皆無に等しい。例えば、遠隔地における物体の触覚や力加減を感じながら握る、離すなどの仕事を行うシステムなどは実産業スケールでは汎用化していない。

これは、触覚の双方向性を実現するための技術的ハードルが予想以上に高く、汎用のデバイスやインフラでは実現できなかったことが一つの要因として考えられる。

4. 「力触覚伝達型遠隔操作システム」プロトタイプの開発

ここからは、「力触覚伝達型遠隔操作システム」のコンセプト実現に向けて挑戦・開発してきた事例を順に説明する。

(1) 1号機

2017年9月にスタートアップ企業と共に力触覚伝達型遠隔操作システムのプロトタイプ1号機となる「EXOS」(写真—1)を完成させた。

これは操作者側(マスタ側)と遠隔側(スレーブ側)が同期して動作するもので、スタートアップ企業が開発した外骨格型の力触覚提示デバイス、五本指ハンド、ロボットアームの技術を採用している。

また、遠隔地の映像は360°全地球カメラでリアルタイムに撮影され、操作者はヘッドマウントディスプレイ



写真—1 プロトタイプ1号機



写真—2 プロトタイプ2号機



図—2 ARによる操作画面

レイ（HMD）を介して、状況を確認できる。

ここに、仮想現実（VR）と拡張現実（AR）技術を活用し「ロボットアームの仮想操作コントローラ」と「操作者自身の仮想の手」が重ねて投影される（図—2）。

操作者は、「VR空間で、ARで表現された仮想の手を仮想操作コントローラに重ね合わせる」ことで現実のロボットを動作させる。これは2019年の現在でも応用可能な操作手法であると考えている。

このプロトタイプ1号機にてテストを繰り返した結果、力加減を感じながら遠隔操作ができることや、遠隔操作した動作データを記録してデータ編集し、動作の再生が可能であることが実証できた。

(2) 2号機

1号機の完成以後、ロボットや制御機器メーカーの協力も加わり、2018年6月には産業用ロボットと産業用PCを利用した力触覚伝達型遠隔操作システムのプロトタイプ2号機を完成させた（写真—2）。

2号機では本技術が生産施設に実装される姿を意識した。操作側のロボットには小型の人協働ロボットを、遠隔側には医薬品製造にも適用可能な産業用ロボットを選択した。また、遠隔操作の制御においてはインダストリー4.0時代を意識し、国際規格に準拠した機能が搭載された産業用PCなどを採用した。

2号機においても1号機同様に力加減をリアルタイムに双方向情報伝達し、操作者が遠隔地の物体の固さ、柔らかさを感じながら正確な操作が可能であること、および力触覚伝達型遠隔操作データの記録・編集・再生が可能であることなどを実証することができた。

(3) 第5世代移动通信システム（5G）との連携

2018年7月には先述の2号機を用いて、第5世代移动通信システム（5G）を利用した力触覚伝達型遠隔操作実証実験を実施し、遠隔地の映像・ロボットアームの動作・力触覚の全てのデータを一度に5Gで通信する遠隔操作に成功した（図—3）。また、同時に力触覚伝達型遠隔操作データの記録と動作の再生にも成功した。この結果から本技術は5G環境においても技術親和性があり、モバイル通信環境においても遠隔地からの労働力提供や技能データ蓄積なども期待できることが分かった。

5. AI（人工知能）との連携

(1) タスクの選定

2号機の成果とシステム構成を元に、2018年10月より「AIとの連携」を開始した。

これは人間が行う力触覚伝達型遠隔操作による操作データを「教師データ」として蓄積し、AIに学習させることでロボット自身が分身のように自律的に動作して人間に与えられたタスクを実施できるか検証するチャレンジである。

ここで、ロボットには「液体の計量」作業をタスクとして与えることとした。勿論その他のタスクを選定することもできるが、三品産業では現在も多様な液体を多様な計量パターンで小分けするような作業が労働集約的に行われている。

また作業に一定の熟練度を要するため、「チカラ技」によるアプローチとなり、「難題」解決を象徴する動作であると考えた。



遠隔操作検証実験概要図

図-3 5Gによる遠隔操作実験概要図

AI（人工知能）にはAIスタートアップ企業の「マルチモーダル AI」技術を採用した。

マルチモーダル AIでは、映像・触覚・電流値・重さなど、データ形式の異なる複数の情報を時系列に揃えることで、一つのデータ（マルチモーダルデータ）と見做す。

今回の AI 連携では、人間が力触覚伝達型遠隔操作で行う一連の「液体の計量」動作をマルチモーダルデータとして連続的に取得する。これを教師データとしてマルチモーダル AI で一括ディープラーニングして学習モデルを作成することを計画した。

液体の計量に用いた液体は、水のほか、粘度の異なる2種類のグリセリンの合計3種類である。また、計量動作は500 mlのメディウム瓶（写真-3）から500 mlのピーカへ液体を注ぐ方法とした。

なお、グリセリンを選択した理由には、その粘度の高さの他に、粘度が温度によって変化しやすい性質が挙げられる。つまり粘度が常に一定とは限らない液体に対しても AI が自律的に、精度よく計量できるかどうかを検証することとした。

(2) 教師データの作成

教師データ蓄積作業は、実際にロボットに行わせる

計量動作と同じ、図-4のような動作シーケンスに基づき実施した。

マルチモーダル AI に学習させる教師データは2つのアクションから取得することとした。

1つは、図-4における動作③である。これは AI に自ら計量しようとしている「液体の性状」を認知させるために取り入れたステップである。

産業用ロボットがメディウム瓶を掴み、カメラの前に差し出して一定振幅で一定時間左右に振る。この振とう動作は予めプログラムされており全ての計量動作で一定である。

この振とう動作によってメディウム瓶の中の液体が揺れ、液面に波が起る。この波の状況が粘度や液量によって異なる様子を AI が特徴として捉えることを期待した（図-5）。

もう1つは、図-4における動作⑤で、人間が遠隔操作でロボットに液体の注ぎ方を教えるものである（写真-4）。

遠隔操作にあたっては、人間には目標計量値を課さない手法を採用した。

例えば、人間が100g、200gといった予め決まった計量値にぴったり合わせる動作を行うのではなく、逆に作為なく計量動作を行う。その計量値が287.4g

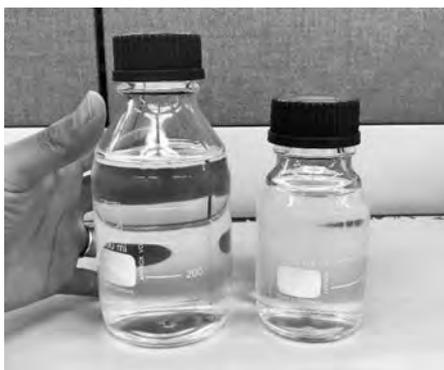


写真-3 メディウム瓶

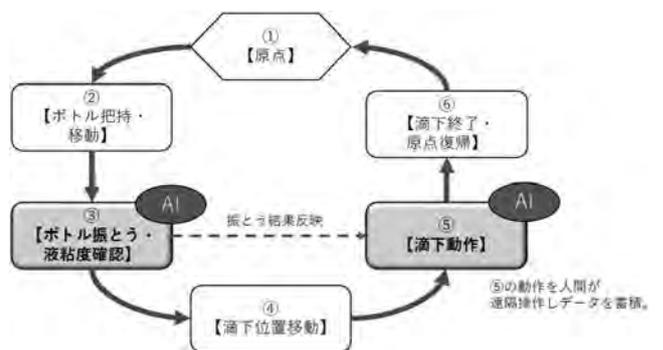
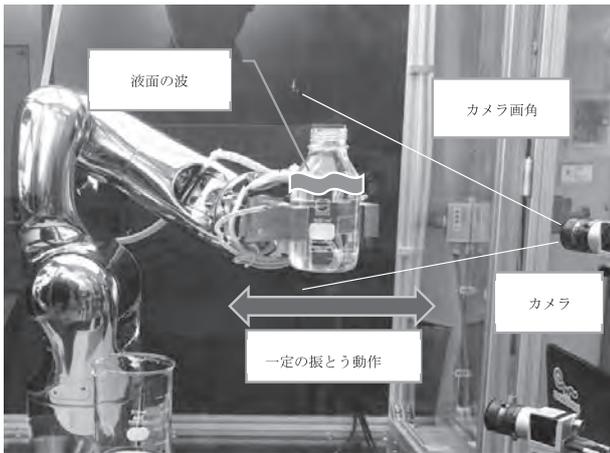


図-4 AI 自律計量動作シーケンス



図一五 メディウム瓶の振とう動作

(3) AI による自律計量の結果

2019年2月に、3種類の液体を用いた合計約100パターン程度の教師データを取得し、1回目のディープラーニングを実施した。

ここで生成された学習モデルに計量値のみ指示して力触覚伝達型遠隔操作システムに自律計量動作を行わせた。この時メディウム瓶の中にある液体の種類、量、粘度や比重などの情報は与えなかった。

この結果、人間が実施する遠隔操作に近い「独特の動き」を見せながら、平均計量誤差約±5%以内の精度でAI自律計量に成功した(写真一5)。



写真一四 遠隔操作による滴下動作の教師データ取得



写真一五 AIによる自律計量動作

表一 取得した教師データの種類

取得した教師データの種類
6軸ロボットアームの各軸角度
軸電流負荷
軸トルク
ボトルを把持する触覚センサ値
カメラ映像
電子天秤の値

であった場合、教師データには「初めからその動作が287.4gを期した完璧な動作であった」として後出し記録するのである。

これを繰り返すことで、「完璧な教師データ」を短時間で作成することができる。

教師データに含まれるデータの種別を表一に示す。

AI自律計量の様子を観察すると水、グリセリン共にその粘度、メディウム瓶に入っている液の残量などの状況に応じて、巧みな動作を生成している様子が伺えた。

さらに、人間の遠隔操作で無意識に行っていた「メディウム瓶の口に残る雫を1滴落とす動作」や「粘りの強い液体の液切り動作」などのテクニックも高い頻度で再現しており、人間らしい「熟練技能の再現」が確認できた。

(4) AI 自身による自律計量の精度向上

このシステムの優れている点は、「AI自律動作した結果」も教師データとして再利用が可能であるというところにある。

人間の教師データ作成にあたり計量値を「後出し」したように、例えばAIに300gの自律計量動作をさせ、300.12gを計量したケースにおいても「この動作は300.12gの計量動作であった」と常に完璧な動作の

教師データとして後出しで記録してしまうのである。

このように、AIは自律動作を繰り返せば繰り返すほど完全な教師データを多く蓄積することができ、ディープラーニングを繰り返して、「個人練習する」ように精度が向上していく。

自律計量において追加したい動作があれば、人間の遠隔操作による教師データの追加も可能であり、また不完全と思える動作データは削除することも可能である。

このようなAI自律計量動作を繰り返し、教師データの再取得と良質な教師データの選別により、2019年4月の時点で平均計量誤差は±0.2%以内まで向上、人間による液体計量精度を上回るまでに成長した。

2019年5月15,16日に大阪で開催された展示会「第1回夢洲次世代まちづくりEXPO」において、このAI自律計量ロボットと展示会来場者で液体計量精度を競うトライアルを実施したところ、ロボットの圧勝となった(図-6)。

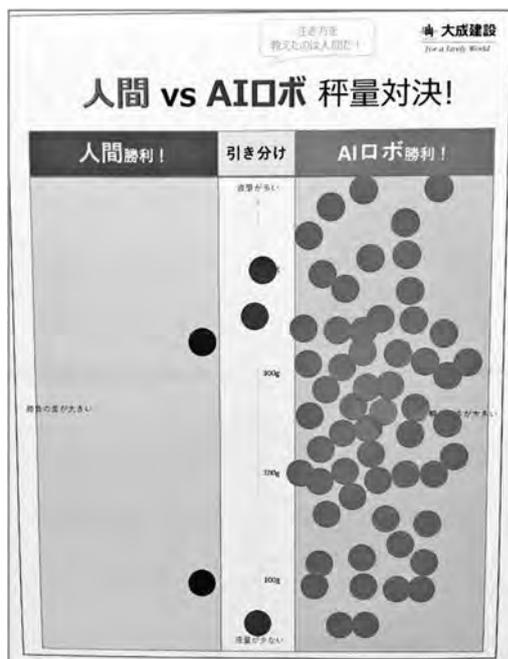


図-6 人間とAIロボットが液体の計量精度を競う

(5) バリエーション

AI自律計量に成功した結果を受け、さらに次のような教師データを追加してディープラーニングを行った。

- ・内部の液体が見えない背の高いステンレス製の容器に注ぐ。
- ・内部の液体が見えない背の低い「お椀」に注ぐ。
- ・内部の液体が見えないようにアルミで覆ったメディウム瓶に注ぐ。

上記に共通するチャレンジはAIに対する「視覚情報」の遮断と、画像認識技術をアドオンせずに容器の

高さを認識できるか、というものである。

これらについて人間が遠隔操作を行って3種類の液体合計30パターン程度取得し、ディープラーニングを行った。

その結果、瓶や容器の中身が見えない状態でも容器の注ぎ口高さに応じてメディウム瓶の高さを自律的に調節しながら、平均計量誤差が±0.5%以内を達成するというAI自律計量動作に成功した。

さらに、教師データを一切与えていない液体や物質の計量にもチャレンジした。驚くべきことに、今まで経験したことのない液体や物質に対しても高い頻度でAI自律計量動作を生成し、場合によっては実用的なレベルを満たす高い計量精度を叩き出すものもあった。

これはマルチモーダルAIで生成した学習モデルが、未学習の物質に対しても計量できるポテンシャルがあり、AI自律計量データのみで計量精度の向上が期待できる、まさに「少ない工数」で「一定の熟練度」かつ「多様な作業内容」が実施できる可能性を感じさせるものである。

6. 考察

何がここまで良好な計量精度を生み出しているのだろうか。現在でも解明できていない部分が多い状況ではあるが考察してみようと思う。

一つには、動作そのものはシンプルと言える「液体を注ぐ」という計量動作のタスクに対し、非常に多様でボリュームのあるデータが取得できたことにある。

単純に見えるタスクであっても、人間は視覚的・触覚的に液面変化と重量変化を繊細に捉えている。具体的には、人間は無意識に、メディウム瓶の注ぎ口と注がれようとする液体の位置関係、容器へ滴り落ちる液体の様子、注ぎ口に残った一滴のしずくの量感などを視覚的に捉える。また、指先、腕、体幹の動きによってボトル内容物の量や粘性、重心の位置がどのように推移するか、場合によっては聴覚も駆使して状態検知する。これらのセンシングデータを駆使して「少し先の未来」を予測しながら液体を注いでいるのである。

また、AIの視界情報を遮断する試みからは、AIが視覚以外の感覚を研ぎ澄ませ、力触覚やロボットアームの軸トルクなどのセンシングデータから精度の高い計量動作を生成していることが推察される。

これまで知られていたロボット制御手法では、「人間らしい」タスクを実行することは容易ではなかった。それはタスクに伴う感覚面を人間やコンピュータ

の言語で理解し、記述することが必要であったことに他ならない。

今回、適用した「マルチモーダル AI」技術は近年研究が進んでいる、人によって感じ方の違う情報を等価に扱うディープラーニングが可能な AI 技術である。「液体を注ぐ」計量動作に伴う多様な感覚=センシングデータをそのまま一括で扱うことが、ロボットらしくない、人間のような動作による高精度の計量動作の生成を可能にしているであろう。

さらに、人間の技能を超えた精度が実現できることが分かったことは大きな驚きである。ロボットはタスクを教えた人間よりも匠に育ってしまうのである。人間の「匠の技」をロボットにコピーし、その技量の範囲内で動作させようとする思い込みが覆されるものである。

いずれにせよ、力触覚伝達型遠隔操作システムにおいては機械の方が人間の能力よりも優れている部分を有効に活用していく姿勢、つまり「人間の良いところ」と「機械の良いところ」を共存させたコンセプトに高精度の謎を解き明かす手がかりがあると考えている。

7. 将来展望

「遠隔操作」とは「操り人形」のようでもあり、操る糸が切れる=データ伝達手段が途切れれば原則的には遠隔操作は行えない。しかし今回のように遠隔操作のデータを蓄積してマルチモーダル AI でディープラーニングすると、操られる人形側が自律し、手取り足取りせずとも意図した動作をできるようにする。学習モデルは人間から動作を学んだ「脳」のようであり、時としてその能力は人間をも超える。

将来的には IoT、5G 技術を利用することで様々な人間の遠隔操作データを効率よく収集し、マルチモーダル AI でディープラーニングして学習モデルを生成し、省力化・自動化を求める生産現場に配信することによって人間とロボットをつなぐ糸を取り払い、あらゆる現場の生産性の向上に貢献できることを期待したい。

例えば、クリーンルームや危険地域における遠隔作業においても適用が期待できる。

クリーンルームの例では、人間自身がクリーンルームにおける最大の汚染源と言われている。できるだけ少人数の入場者とし、塵埃の出にくいクリーン作業着を着用し、防護マスクやゴーグルを着用するなど更衣にも大きな負荷がかかるため決して快適な作業環境とは言えない。

この技術を応用して一般居室から作業者がクリーンルーム内の作業を遠隔操作できれば、クリーンルームへの入場人数を減らして人員由来の汚染が抑えられるうえ、更衣や空調にかかるコストも低減できる可能性がある。

今後、労働集約型作業と共に特殊な作業空間においても実証実験を進めていく予定である。

8. おわりに

世界規模で技術革新や産業構造の変化が起こっている。

感覚の双方向性を伴って人間の動作をダイレクトにロボットに転写し、場所・文化・タイムゾーンを超えた身体の拡張を目指すという遠隔操作の概念は「アバター（分身）技術」とも言われ、急速に技術開発が活発化している。

興味深いことに、この技術開発に挑戦する企業の業種や規模は様々である。まさに旧来の産業構造にとられない技術的チャレンジの一つとも言える。

本稿で紹介した事例では、建設業からは縁遠い存在と考えられていたスタートアップ企業や異業種企業との協業に取り組んでおり、その結果として従来の建設技術の文脈とはひと味違う、思い切った技術コンセプトを実証することができた。

尚プロトタイプ1号機「EXOS」は exiii ㈱、プロトタイプ2号機は㈱デンソーウエーブとベッコフオートメーション㈱、5G との連携はソフトバンク㈱、AI との連携は㈱エクサウィザーズとの協業により実現した。

筆者らは、人間の動きを学習してロボットが自律動作する技術がもたらす人間の働き方の未来に想いをよせるとともに、建設業においてもこの技術が広く活用されていくことを期待している。

JCMIA

【筆者紹介】

大手山 亮 (おおてやま りょう)
大成建設㈱
エンジニアリング本部
エンジニアリングソリューション部
自動化ソリューション室
シニアエンジニア



廣木 正行 (ひろき まさゆき)
大成建設㈱
エンジニアリング本部
エンジニアリングソリューション部
自動化ソリューション室
シニアエンジニア

