

柔軟な働き方を可能にする遠隔操縦技術の開発

Development of Remote Control Technology That Offers a Flexible Working Style



島田 忠雄①	Tadao Shimada
山口 潤②	Jun Yamaguchi
大林 航③	Wataru Obayashi
瀬川 武紀④	Takenori Segawa
中野 信一⑤	Shinichi Nakano
香川 圭明⑥	Yoshiaki Kagawa

少子高齢化による労働者不足は3K職場において顕著で、労働環境の改善が急務である。その解決策の一つとして、製造現場の作業をリモート化することが求められている。

工場内の機器をつなぐネットワークは有線が基本だが、これは無線だと応答性や信頼性が確保できないためである。しかし多数の機器を有線で接続するのは、物理的にもコスト的にも制約があり、ネットワークを使った遠隔操縦の実用化は難しかった。ところが5Gの登場でこれらの制約条件が大きく変わった。そこでネットワークにローカル5Gを使って無線化し、ロボットの遠隔操縦の実現に取り組んだ。

Because of the declining birthrate and aging population, there are serious labor shortages in so-called “3D” (Dirty, Dangerous, and Demeaning) jobs such as manufacturing, and the improvement of working environments is an urgent task. As one of the solutions to this problem, the remote control of manufacturing work is required.

Basically, a wired LAN is used to connect to different pieces of factory equipment as Wi-Fi cannot provide adequate responsiveness and reliability. However, there are physical and cost constraints to connecting many pieces of equipment by wire, and therefore, it is difficult to realize remote control using wired networks. However, the emergence of private 5G has changed these constraints dramatically. We have developed to realize the remote control of robots by making networks wireless using private 5G.

まえがき

日本の総人口は、2011年以降一貫して減少しており、少子高齢化による労働者不足が問題になっている。少ない労働者は3K職場に集まりにくく、労働環境の改善も急務となっている。

1 背景

近年、工場内の機器や作業者のデータにIoT技術を活用して取得し、これらを分析・利活用することで新たな付加価値を生み出せるようにするスマートファクトリーが注目されている。スマートファクトリーを実現するには工場内ネットワークを柔軟かつ効率的に構築することが可能となる無線通信が必須であり、その候補がローカル5Gである。

2 製造のリモート化

コロナ禍でオフィス作業のリモート化が急速に進み、会

議もWeb利用が一般的になっている。一方で製造現場の作業は、現場の工作機器を使って材料を加工し、現場で組み立てるのが基本である。このためリモート化が難しい。

搬送、加工・組立、検査、出荷等の製造現場の典型的な作業をリモート化する場合、まずは無人搬送車AGV (Automatic Guided Vehicle) やロボットを使ってできるだけ無人化し、これらを遠隔操縦することが考えられる。この場合、現場の様子をモニターで監視しながら通信を使って機器に操作指示を送り、受信した動作結果によって次の指示を送るという作業を繰り返す必要がある。このために機器がネットワークに繋がっている必要があるが、工場内の多数の機器を有線で接続すると膨大な数のLANケーブルやハブなどのネットワーク機器を工場内に設置することになる。また製造する製品が変わってレイアウト変更になると、多数のLANケーブルを引き直すことになることから、リモート環境の整備に多くの準備を要する。そのため、リモート化には通信の無線化が非常に有益である。

工場への無線LAN導入も進んでいるが、ノイズの影響を受けやすく安定した通信を行うことは難しい。また、機

器同士は高速にデータの送受信を行っており、データ通信が遅れると正常動作できない。そのため、信頼性が高く、高速で低遅延の無線通信が求められる。ここで期待されているのが第5世代移動通信システム（5G）である。

一方で、遠隔操縦で人の作業を実施できるロボットも必要であり、そのためのロボットシステムとして、当社では「Successor¹⁾」を製品化している。「Successor」は、専用の操縦装置であるコミュニケータを使ってロボットアームを遠隔で操縦して作業することができる。社会の高齢化により、高度な製造技術の担い手である熟練技術者の技能伝承が、多くの先進国において共通の課題となっており、「Successor」は、これを解決するための新しいロボットシステムである。

そこで、製造現場のリモート化実現に向けて遠隔操縦ロボットへの無線通信適用に取り組んだ。

3 工場通信の無線化における技術課題

5Gは日本では2020年春から商用サービスが開始された通信システムの規格であり、超高速・多数同時接続・超低遅延という特長を持つ。そして携帯電話事業者による5G（キャリア5G）とは別に、図1に示すような一般の企業や地方公共団体などが独自に5G通信網を構築できるローカル5Gがある。これは、5Gから新たに導入された制度で、キャリア5Gのサービス提供状況とは関係なく、最適な5Gを柔軟に構築し、運用できるものである。

産業適用にも期待される5G通信であるが、これまで無線通信は、情報通信を主体に利用されている。そこで、産業適用に求められる以下の性能を検証する必要がある。

① 通信速度

遠隔地の加工状況等を把握できるためには高精細映像（HD画像や4K画像等）の転送が必要となる。

② 通信遅延

5G通信で機器を制御するために最も重視されるのが、遅延量である。工場の製造機器やロボットは、ミリ

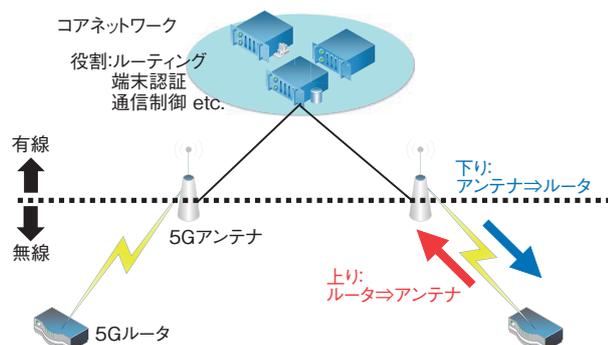


図1 ローカル5Gシステム
Fig.1 Private 5G system

秒単位の時間で制御されており、装置間の通信がわずかに遅れただけでも正常動作しなくなる可能性がある。

③ 通信エリア

5Gの高速性を支えるミリ波は、空気中での減衰が大きいので、電波の到達距離はかなり限定される。工場の現場でどこまで電波が届くかを検証する必要がある。

④ 耐環境性（耐ノイズ性）

工場内には大型クレーンやフォークリフトなどのさまざまな工作機械が稼働している。これらはノイズの発生源になったり、電波の障害物にもなる。実際に工場が稼働している状況で、通信の安定性を検証する必要がある。

4 検証概要

これらの技術課題について、5Gがどの程度の性能を発揮できるか、2020年11月から2021年1月にかけて播磨工場に5Gの設備を試験的に導入し、実証試験を実施した。

今回使用した5G通信は、NSA（Non Stand Alone）と呼ばれるタイプで、コアネットワーク（認証やデータパケットの転送経路の設定、移動制御などの機能を持つ設備）には4Gのものが用いられている。一方、本来の5G通信はSA（Stand Alone）と呼ばれるタイプで、無線通信からコアネットワークまで、すべての基地局設備を5G専用機器で構成されるが、製品化はこれからである。なお5Gの3つの特長のうち、NSA方式で実現できるのは高速大容量だけで、遅延性能は4Gと同等である。

遠隔操縦ロボットには、播磨工場の「Successor-G²⁾」を使用した。これは研削・バリ取り・表面仕上げ用としてシステム化したロボットである。作業者はコミュニケータを操作することで、力作業が不要になり、暑さや粉塵といった悪環境からも解放される。

現状の「Successor-G」での遠隔操縦は、作業対象が目視できる距離にある想定で、コミュニケータとロボットは有線LANで接続されている。図2に示すように、ローカル5Gを使って無線化し、遠隔から4K映像を見ながら操縦可能か、すなわちリモート化可能かを検証した。

試験のステップを図3に示す。まず5Gアンテナを播磨工場内の技能研修施設匠塾の1Fに設置して、基本性能試

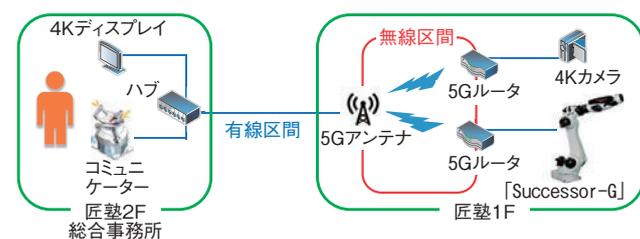


図2 「Successor」の5Gシステム構成
Fig.2 5G system configuration for Successor

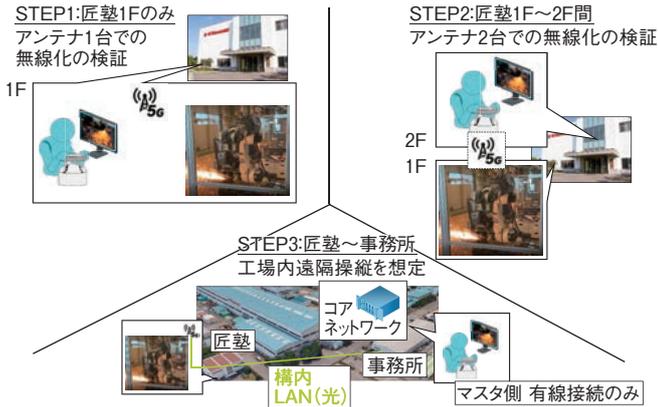


図3 試験ステップ
Fig. 3 Test steps

験と「Successor-G」の遠隔操縦試験を実施し、次に播磨工場内の製缶棟に5Gアンテナを移設し、通信エリアや耐ノイズ性を検証した。コアネットワークは播磨工場の総合事務所に設置した。

5 検証内容と結果

(1) ローカル5Gの基本性能試験

匠塾と製缶棟の5Gアンテナの位置を変えながら、ネットワーク計測器を使い、通信速度・遅延量・電波強度などを測定した。

①② 通信速度と通信遅延

通信速度Max下り650Mbps・上り120Mbpsと仕様通りの性能であった。通信遅延は平均6msであった。NSAの性能としては予想よりも小さく、高性能であった。

次に4K高精細映像の伝送試験を実施した。この結果、3台の4Kカメラで同時に伝送可能であり、工場内を巡回しながら現場の様子を事務所へ送ることができた。4Kの高精細映像で遠隔監視が可能になると、環境の悪い作業現場での監視業務がかなり軽減できる。

③ 通信エリア

奥行300mの製缶棟内を移動しながら各ポイントの電波強度や通信速度などを計測した。この結果、4K映像が送れる上り25Mbps以上の速度が出るのは、アンテナから50m以内であり、100m以上離れると性能が低下することが分かった。特にアンテナからの見通しが重要であり、遮蔽物がなければ260m離れても4K映像が送れる上り30Mbpsの速度が得られた。工場内には大小さまざまな工作機械があるため、アンテナ設置位置に配慮が必要である。なお、ミリ波の通信エリアに関しては周辺環境にかなり影響される懸念があったが、匠塾1Fに設置したアンテナで同じ建屋の2Fでも通信可能であった。

④ 耐環境性(耐ノイズ性)

意図的にノイズを発生させる試験を実施しなかったが、工場内では通常の作業を実施しており、工作機械の稼働に伴うノイズや溶接時のノイズなどが発生していた。その環境でも試験中に通信が途絶したり不安定になることはなかった。工場現場の環境でも十分な耐ノイズ性があると期待できる。

(2) 「Successor-G」の遠隔操縦試験

検証した作業は鋼材のグラインダ掛けである。グラインダとは、円盤状の砥石が高速で回転する工具で、研削作業に用いられる。グラインダは2~3kgの重さがあり、図4(a)に示すように研削作業中ずっとワークに押し付けることが必要な重労働である。また、研削の騒音や切粉の飛散があり、作業環境としても厳しい状況と言える。

「Successor-G」には力覚フィードバックの機能があり、コミュニケータを操作してロボットが持ったグラインダが鋼材に接触すると、コミュニケータに反力が伝わる。この



(a) 人手



(b) 「Successor-G」

図4 グラインダ作業
Fig. 4 Grinder work

機能により、図4(b)に示すように実際にグラインダを押し付けている力を感じながら、研削作業を行うことができる。これにより、重いグラインダを持つことなく、グラインダを手持ちで操作しているのと遜色ない操作性が得られる。この仕組みはロボットに付加している力センサの出力を、コミュニケータに高速にフィードバックすることで実現している。しかし、コミュニケータとロボット間の通信に遅延が発生すると、接触感を正しく再現できなくなり、操作性の悪化につながる。

ロボットは匠塾の1Fにあり、コミュニケータを総合事務所へ設置して遠隔でのグラインダ作業を実施した。

4K映像の大容量データとロボットの制御信号を5Gで同時に送信することで、作業者は、鋼材の研削状態を50インチのディスプレイに映し出されるで高精細な4K映像で見ながら、コミュニケータの力覚フィードバックを頼りに、グラインダの研削作業を行うことができた。

複数の被験者が作業を実施したが、スムーズな操作ができず引っ掛かりを感じるという評価もあった。これは試験に使用したNSAのローカル5Gシステムでは超低遅延が実現できていないことで有線通信に劣る操作感になったと考えられる。今後SA仕様の5Gが実用化されれば、有線LANと遜色のない操作性が期待できる。無線通信の安全性や信頼性についてはこれからも検証が必要であるが、無線化が可能になると、将来的に工場内を自由に動き回るロボットをリモートから遠隔操縦し、現場の実作業を実施することができるようになる。「Successor-G」により力作業や悪環境から解放された作業者が、5Gの導入で現場作業からも解放されることになる。

今回の試験では、匠塾から直線距離で約200mの総合事務所から操縦したが、将来的に工場間を結ぶ遠隔操縦や、自宅から工場のロボットを操縦することを想定した場合、工場間や工場と自宅間の距離が問題になる。この間は光ファイバを使った有線接続になるが、光ファイバの遅延量は、 $5\mu\text{s}/\text{km}$ であり、往復の遅延が1msになるのが片道100kmの距離になる。6msの遅延で操作性の悪化が見られたが、SAの5Gが1msの超低遅延を達成できたとしても、有線区間が500kmあると遅延は6msになる。遅延を2~3msに抑え現状と遜色のない操作性を得られる距離は、100~200km以内になる。さらに通信経路の途中にはルータなどのネットワーク機器が設置されており、これらの機器の遅延も考慮すると、現時点では力覚フィードバックを実現できる距離は50~100km程度と想定している。通勤圏からの工場現場のリモートワークは実現可能な範囲と考えられる。

6 今後の展開

遠隔操縦ロボットで力覚フィードバックを実現できる距離は、50~100km程度と予想されるが、それ以上離れた場所での操縦には、シミュレータを利用し仮想空間で作業することも考えられる。シミュレーションを高精度に行う必要があるが、仮想空間と実空間をシームレスにつなげるデジタルツイン技術が注目されており、この分野の発展が期待できる。そのほかにも、操作自体はゲームのコントローラのような簡易なデバイスで実行し、遠隔操縦ロボットに実装したAIが精密な動作を実行するというアプローチも考えられる。

さらに運用データや製造スケジュールなども連携させ、将来の工場では顧客に品質、コスト、納期を最適化して製品を提供することを目指していく。

あとがき

ローカル5Gは、運用に免許が必要かつ高コストといった運用面での課題があるが、将来的には無線による遠隔操縦で各種作業が可能になり、「Successor-G」などのソリューションを組み合わせることで、人口減少による労働力不足への対応・労働者の3K職場からの解放・熟練作業者の技能伝承などの効果が期待される。

今回の実証試験にご協力いただいた、株式会社オペレージへ感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 掃部, 麻川, 蓮沼: “リモートでの生産・労働を実現する新ロボットシステム「Successor」”, 川崎重工技報, No.183, pp.14-17 (2021)
- 2) 赤松, 上月: “研削・ばり取り・表面仕上げ用遠隔操縦ロボットシステムの開発”, 溶接技術 2020年7月号



島田 忠雄



山口 潤



大林 航



瀬川 武紀



中野 信一



香川 圭明