

# クローラを用いた屋外監視ロボットシステムの開発 —公衆5G回線を用いた遠隔監視と制御—

○段上 将門 (九州大学), 倉爪 亮 (九州大学)

## Development of Outdoor Surveillance Robot System using Crawlers -Remote Surveillance and Control using Public 5G-

○Masakado Danjo (Kyushu University), and Ryo Kurazume (Kyushu university)

Abstract : In this research, we developed an outdoor surveillance robot system using public 5G. The robot patrolling outdoors is connected to observers via the Internet, and the observers control the robot and monitor camera images remotely. We introduce the mechanism of the remote communication system and show measurement 5G communication speeds.

### 1. 緒言

急速に深刻化する少子高齢化と、それに起因する様々な社会問題への解決策として、今まで人が行っていたサービスをロボットを用いて自動化・補助を行う取り組みが加速している。特に警備業界では、慢性的な人手不足が問題となっている。その原因として、拘束時間が長く、夜間作業が多いという時間的制約、屋外であり暑さや寒さの影響を受けやすいという肉体的な負荷、危険が伴う可能性があるという精神的な負荷が大きいことが挙げられる。

これに対し、我々はこれまで、夜間に屋内外を自律で移動し、人に代わり異常や不審者の発見を行う警備ロボットシステムを開発している [1]。夜間のパトロール作業をロボットに代替させることで、警備作業の負担軽減が期待できる。[1]では、ロボットと、映像の監視・制御を行うPCとの通信に、WiFi ルータ経由の無線 LAN を用いていた。WiFi ルータの電波が届く範囲は約 100m であるのに対し、ロボットは数百メートル程度の移動を行う。そのため、あらかじめ複数の WiFi 基地局をロボットの移動環境に設置する必要があった。

そこで本研究では、ロボットに 5G ルータを取り付け、公衆 5G 回線を用いた通信を行う。システム全体の概略を Fig. 1 に示す。ロボットは通常は屋外でのパトロールを自律的に行い、監視者は屋内でロボットからのカメラ映像を監視し、必要な場合にはロボットの制御を遠隔で行う。ロボットの自律移動等の制御システムには ROS2 を採用しており、カメラ映像の送受信も ROS2 を用いて行う。本稿では、まず開発したシステムについて述べた後、遠隔通信実験の結果について報告する。

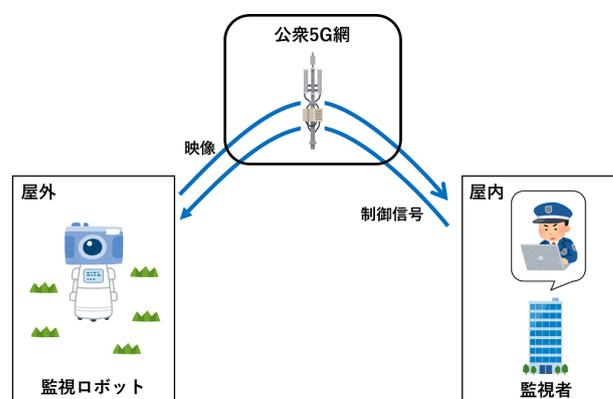


Fig. 1 System concept

### 2. ハードウェア

ロボット全体のハードウェア構成を Fig. 2 に示す。足回りには小型不整地移動クローラユニット (リコー) を採用し、小さい段差を乗り越えることが可能である。クローラの上に箱を載せ、中にモバイルバッテリーとロボット全体を制御するための小型 PC (NUC, Intel) を搭載した。モバイルバッテリーは小型 PC や LiDAR などへ電力の供給を行っており、一回の充電で 4 時間以上の稼働が可能である。箱上部には周囲の障害物の検知のために 3D LiDAR (HDL-32E, Velodyne) を、またロボット上部には自己位置推定のための GNSS アンテナ (Chronosphere-L6 II, コア) を搭載した。リモート PC との通信に必要な 5G ルータ (Wi-Fi STATION SH-52A, NTT ドコモ) は、発熱が大きいので、Fig. 3 のように本体が外気に触れる面積がなるべく大きくなるよう固定器具を設計し、箱裏に設置し

た。周囲の様子の監視のため、ロボット正面の撮影用に暗視カメラ (MCS-E290, インフィニテグラ) を、周囲の撮影用に 360° カメラ (Theta V, リコー) を用いた。

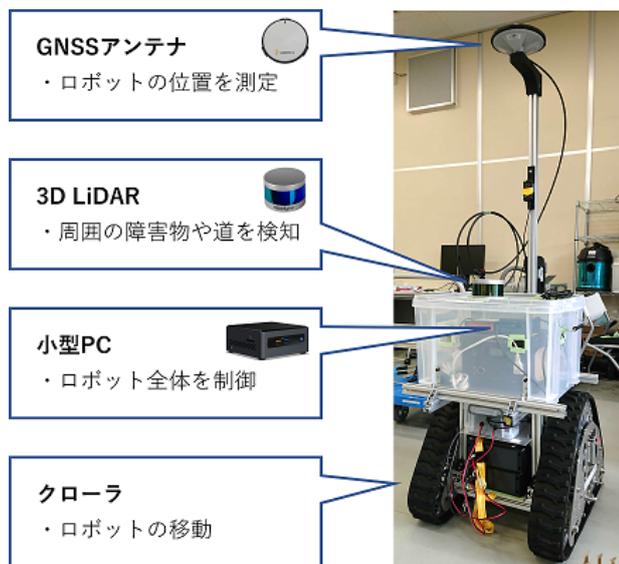


Fig. 2 Outdoor surveillance robot



Fig. 3 5G Router (Wi-Fi STATION SH-52A, NTTdocomo)



Fig. 4 Night-vision camera (MCS-E290, Infinitegra)



Fig. 5 360° camera (Theta V, RICOH)

### 3. 公衆 5G 回線を用いた遠隔通信

#### 3.1 インターネット VPN

インターネット経由での通信を安全に行うために、グローバル IP を持つ VPN サーバをクラウド上に設置し、各 PC が VPN サーバにアクセスすることで、二点間をつなぐバーチャルプライベートネットワーク (VPN) を構築した。VPN のメリットは、ロボットと監視用 PC が仮想的に同一 LAN 上に存在するという点である。これにより、ロボット制御用の ROS2 プログラムで特別な設定をすることなく、通信を行うことができる。

#### 3.1.1 クラウドサービスと VPN ソフトウェア

サーバに用いるクラウドサービスとして、AmazonEC2(EC2) と docomoMEC(dmec) の ComputeV の 2 種類を検討した。EC2 は多くのユーザに採用されているクラウドサービスであり、インスタンスの構築が手軽で利用しやすい。ComputeV は 5G を提供している docomo のクラウドサービスであり、フロントネットワーク、マネジメントネットワーク等の設定を細かく行うことが可能である。

また、VPN ソフトウェアとして、OPENVPN と softether の 2 種類を検討した。OPENVPN はオープンソースのため、自前のサーバ構築が可能であり、構築の容易さや、セキュアで安定な通信が可能である。softether もオープンソースであり、GUI を用いて手軽に利用することが可能である。

サーバと VPN ソフトウェアの組み合わせをすべて試した結果、通信速度など、特に性能の違いは見られなかった。そこで以降の本章の実験では、構築の手軽さや利用のしやすさを考慮し、AWS と OPENVPN の組み合わせで VPN を構築した。

#### 3.2 通信速度テスト

AWS と OPENVPN を用いて構築した遠隔通信システムの通信速度テストを行った。ロボットは 5G を用いて、監視用 PC は固定回線を用いてインターネットへの接続を行った。ネットワーク構成図を Fig. 6 に示す。今回使用した 5G ルータは、WiFi の通信速度が遅い (60Mbps) ため、ロボットと 5G ルータは有線で接続した。インターネットへの通信速度の測定にはスピードテストサイト\*1を利用した。

通信速度テスト結果を Table 1 に示す。5G を用いた通信ではアップロード速度はダウンロード速度に比べ、かなり遅いことが分かった。

Table 1 Speedtest using 5G and OPENVPN

拠点 1	拠点 2	Upload	Download
ロボット	スピードテストサイト	50Mbps	300Mbps
監視用 PC	スピードテストサイト	300Mbps	200Mbps
VPN サーバ	監視用 PC	200Mbps	300Mbps

\*1 <https://www.speedtest.net/ja>

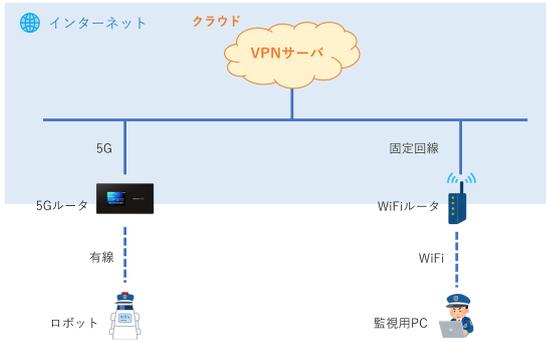


Fig. 6 Network structure using VPN

### 3.3 位置による通信速度の変化の調査

5G 通信は従来のモバイル通信と比べ、障害物に弱いという特徴がある。そのため、5G ルータの位置による通信速度の変化を調査した。九州大学伊都キャンパス内の Fig. 7 に示す 5 箇所、通信速度計測を行った。結果を Table 2 に示す。その結果、場所 1 のような高い建物付近では速度が小さく、周囲に高い建物がない道路付近では速度が大きいという傾向が見られた。



Fig. 7 5G speedtest area

Table 2 5G speedtest

場所	Upload	Download
1	35Mbps	334Mbps
2	46Mbps	381Mbps
3	57Mbps	611Mbps
4	67Mbps	526Mbps
5	48Mbps	429Mbps

## 3.4 実験

### 3.4.1 映像配信実験

構築した遠隔通信システムを用いて、映像配信が可能か確認する実験を行った。5G で送信したカメラ映像を監視用 PC で表示させた。その結果、暗視カメラ映像はなめらかに表示できることを確認した。しかし、360° カメラ映像の配信は、表示された映像がフリーズし、使用できな

かった。

### 3.4.2 遠隔制御実験

遠隔通信システムを用いて、自律移動と映像配信を同時に行うことが可能か確認する実験を行った。映像配信には暗視カメラのみを用いた。監視用 PC で遠隔制御を行い、九州大学伊都キャンパス構内でロボットを約 60m 自律走行させた。近くでロボットの様子を確認するため、この実験に限り、監視用 PC にも 5G ルータを取り付け、5G 通信を行った。実験の様子を Fig. 8 に示す。ロボットの自律移動ができ、また、ロボットから配信された暗視カメラ映像が、監視用 PC で大きな遅れなく表示できることを確認した。

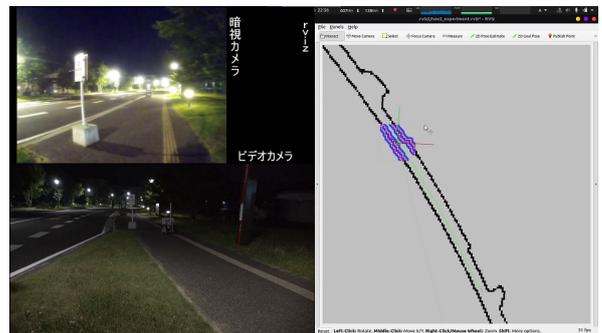


Fig. 8 Remote surveillance experiment

## 3.5 考察

360° カメラ映像の配信ができなかった原因を調べるため、暗視カメラ・360° カメラ映像のビットレートと、映像配信時の送信側 PC のアップロード通信量の調査を行った。送信側 PC、受信側 PC ともに固定回線に接続し、ROS2 のノードを用いてカメラ映像の送受信を行った。Fig. 9 のように LAN を用いて通信した場合と、Fig. 10 のように VPN を用いて通信した場合の結果を Table 3 に示す。VPN を用いて ROS2 通信を行った時、アップロード通信量が通常の 2 倍になっていたことが分かった。先ほどの実験で 360° カメラが配信できなかったのは、5G のアップロード速度が 360° カメラの通信量 (90Mbps) に満たなかったためと考えられる。

Table 3 Bitrate and upload traffic

通信方法	Topic	ビットレート	アップロード通信量
LAN	暗視カメラ映像	6Mbps	6Mbps
LAN	360° カメラ映像	45Mbps	45Mbps
VPN	暗視カメラ映像	6Mbps	12Mbps
VPN	360° カメラ映像	45Mbps	90Mbps

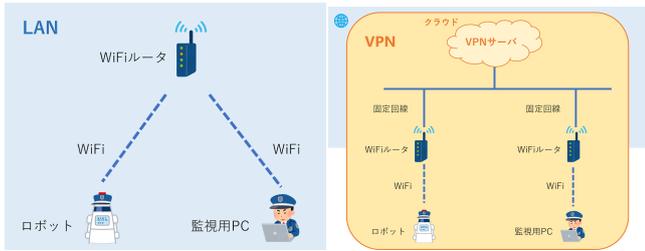


Fig. 9 LAN connection      Fig. 10 VPN connection

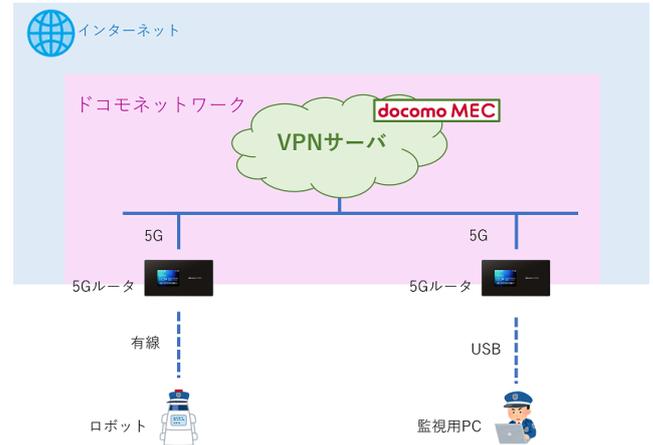


Fig. 11 Network structure using MEC direct

## 4. モバイルネットワーク閉域網を用いた遠隔通信

前章の実験結果から、5G のアップロード速度を向上させることで、360° カメラの配信ができると考えられる。そこで、5G のモバイルネットワーク内で閉じた通信を行った。インターネットを経由せず、通信がモバイルネットワーク内で完結するため、経路が短くなり、通信速度の向上が期待できる。

### 4.1 MEC ダイレクト

5G のモバイルネットワーク内で閉じた通信を実現するために、docomoMEC の MEC ダイレクトを用いた。ネットワーク構成図を Fig. 11 に示す。5G ネットワークのみを用いるため、ロボットだけでなく、監視用 PC も 5G ルータを用いた。MEC ダイレクト接続時、ロボット・監視用 PC はインターネットに接続することができない。その代わりに、互いに IP アドレスを指定し、p2p 通信を行うことができる。また、docomoMEC の ComputeV と連携しており、ComputeV で構築した仮想マシンに接続可能である。

監視用 PC とロボット間で ROS2 通信が可能か実験を行ったところ、p2p 通信は可能であるが、NAT を挟んでいるため、ROS2 での通信を行うことはできなかった。そこで、VPN サーバを ComputeV の仮想マシンに構築した。

### 4.2 通信速度テスト

MEC ダイレクト接続時の通信速度テストを行った。インターネットに接続できないため、スピードテストサイトにアクセスできない。そこで、各 PC が ComputeV のサーバへアクセスしたときの通信速度、p2p で通信したときの速度を調査した。通信速度テスト結果を Table 4 に示す。インターネット経由での通信に比べ、通信速度は大幅に向上した。

Table 4 MEC direct speedtest

拠点 1	拠点 2	Upload	Download
ロボット	ComputeV サーバ	88Mbps	450Mbps
監視用 PC	ComputeV サーバ	79Mbps	425Mbps
ロボット	監視用 PC	97Mbps	84Mbps

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、現在開発している屋外監視ロボットシステムについて報告を行った。監視ロボットに 5G ルータを取り付け、遠隔制御による自律走行と暗視カメラ映像の配信実験を行った。また、MEC ダイレクトを利用した閉域網での通信により、5G 通信速度の向上を試みた。

今後は、MEC ダイレクトを利用した通信により、360° カメラの配信が可能か実験を行う。また現在、360° カメラ映像の配信において、VPN と ROS2 を併用時にアップロード要求速度が倍増するという課題がある。通信容量を減らし、より安定した通信を行うために、使用する VPN を p2pVPN 等へ変更、webRTC などの ROS2 を使用しない 360° カメラ映像配信を検討している。

## 6. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H00230 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 川崎修平, 松本耕平, 河村晃宏, 山科亮太, 青木惇季, 倉爪亮: “クローラロボットを用いた屋外監視ロボットシステムの開発”, 計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI 予稿集, pp.1779-1782 (2020)