公衆 5G 網を用いた 屋外監視移動ロボットシステムの開発

Development of Outdoor Surveillance Mobile Robot System using Public 5G Network

学　段上将門（九大）　○正　松本耕平（九大）
正　倉爪　亮（九大）

Masakado DANJO, Kyushu University
Kohei MATSUMOTO, Kyushu University, matsumoto@irvs.ait.kyushu-u.ac.jp
Ryo KURAZUME, Kyushu University

In this study, we developed an outdoor surveillance robot system using public 5G. The robot patrolling outdoors is connected to a remote observer via 5G and ROS2, and the observer control the robot while monitoring camera images remotely. We tested three network configurations to realize remote communication. Experiments for remote autonomous surveillance were conducted.

Key Words: Remote Control, ROS, 5G

1　緒言

現在，警備業界では，慢性的な人手不足が問題となっている．これは，拘束時間が長く，夜間作業が多いこと，屋外作業であり，危険が伴う可能性があることなどが原因と考えられる．これに対し，我々はこれまでに，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た [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，ロボットと制御を行う PC との通信に，Wi-Fi を採用している．一つの Wi-Fi ルータの通信可能エリアは 100 m 程度であるのに対し，警備ロボットは数百メートル以上の広いエリアの巡回を想定している．そのため，遠隔通信を行うには，あらかじめ複数の Wi-Fi 基地局をロボットの移動環境に設置する必要があり，手間がかかる．

そこで本研究では，公衆 5G 回線を用いた屋外監視移動ロボットの開発を行う (図 1)．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する．また，必要な場合にはロボットの制御を遠隔で行う．遠隔通信に公衆 5G 回線を採用することで，ロボットの通信による移動範囲の制限が無くなり，より広いエリアを走行できるようになる．

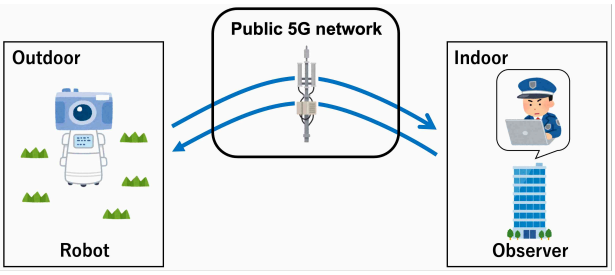

Fig.1 System concept

2　ハードウェア構成

ロボット全体のハードウェア構成を図 2 に示す．ベースとなる足回りには株式会社リコー製の小型不整地移動クローラユニットを用いた．また周囲の障害物の検知のために 3D-LiDAR(VLP-16，Velodyne Lidar, Inc.)，自己位置推定のために GNSS アンテナ (Chronosphere-L6 II，株式会社コア) を搭載した．さらにロボット正面の撮影用に暗視カメラ (MCS-E290，インフィニテグラ株式会社) を，周囲の撮影用に 360 度カメラ (Theta V，株式会社リコー) を搭載した．また，リモート PC との接続のために，5G ルータ (Wi-Fi STATION SH-52A，株式会社 NTT ドコモ)，VPN ルータ (RTX830，ヤマハ株式会社) を用いた．

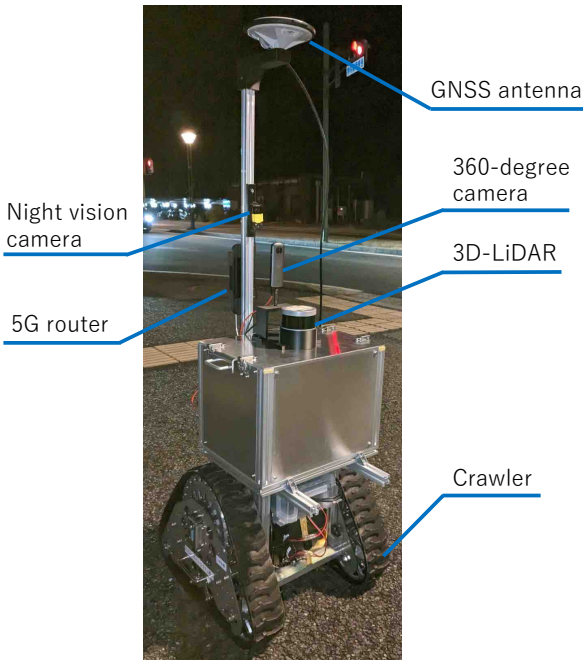

Fig.2 Outdoor surveillance robot

3　ソフトウェア構成

ソフトウェアシステムは ROS2 を用いて構築しており，主に自律移動システムと遠隔操縦システムの 2 つからなる．自律移動システムは，ロボットが目標位置まで自動で移動するシステムで，GNSS を用いた自己位置推定，3D-LiDAR を用いた障害物検知を行う．遠隔操縦システムでは，コントローラを用いて，手動でロボットの遠隔操縦を行う．

通常時は自律移動システムを用いてパトロールを行い，不審者発見時など，状況に応じて遠隔操縦システムに切り替える．

4　ネットワーク構成

システム全体図を図 3 に示す．屋外監視ロボットシステムは，ロボットと監視者の二つに分けられ，5G を用いたネットワークで二点間を接続する．ロボットから監視者に送るデータは，現在位置や姿勢等のロボットの状態，およびカメラ映像である．また，監視者からロボットに送るデータは，ロボットの自律移動指令，並進・旋回速度指令等の制御信号である．よってネットワークには，制御を正確に行うための安定性，低遅延，カメラ映像配信のための大容量が求められる．さらに，システム全体を ROS2 で制御するため，二点間の ROS2 通信を行う必要がある．

本研究では，これらの要件を満たす通信を目指し，3 種類のネットワークを構築した．構築したネットワークについてそれぞれ説明した後，通信速度の比較を行う．

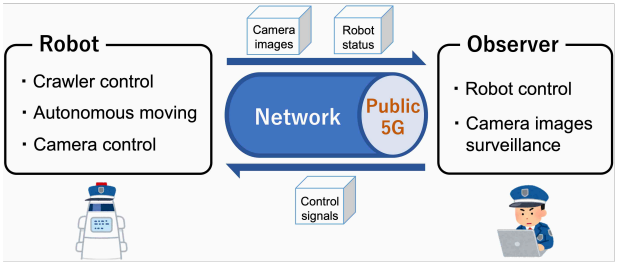

Fig.3 System configuration

4.1　インターネット VPN

インターネット VPN とは，インターネットを経由して拠点間を VPN で接続する手法である．本構成では，グローバル IP を持つ VPN サーバをクラウド上に設置し，ロボットと監視者が VPN サーバにアクセスすることで，二点間の VPN 接続を行う．

インターネット VPN のネットワーク構成を図 4，図 5 に示す．ロボットは有線で 5G ルータへ接続し，5G ルータから 5G で VPN サーバへ接続する．監視者は Wi-Fi で Wi-Fi ルータへ接続し，Wi-Fi ルータから固定回線で VPN サーバへ接続する．ロボット，監視者間は L2VPN で接続されている．サーバを構築するクラウドとして，Amazon EC2，VPN ソフトウェアとして，OpenVPN を用いた．

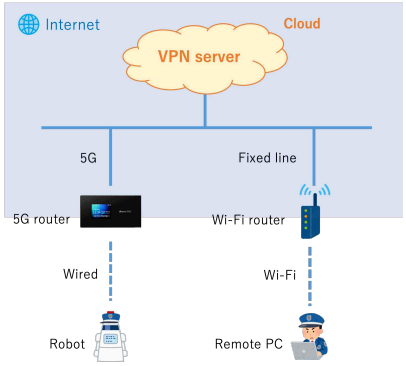

Fig.4 Physical network diagram of Internet VPN

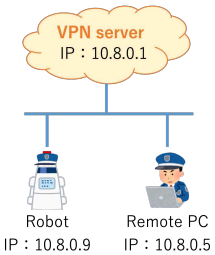

Fig.5 Logical network diagram of Internet VPN

4.2　MEC ダイレクト＋ OpenVPN

インターネットを経由した通信では，混雑状況により，通信が不安定になり通信速度低下が起こる．そこで，5G のモバイルネットワーク内で閉じた通信を行う．インターネットに出る前のモバイルネットワーク内で通信が完結するため，インターネット VPN に比べ，安定性，通信速度の向上が見込める．この閉じた通信を実現するために，MEC ダイレクトを用いた．

MEC ダイレクトは docomo により提供されている通信サービスで，5G 端末をクラウド基盤を直結し，低遅延，高セキュリティの通信を行うことができる．また，5G 端末間通信に対応しており，遠隔地への動画像のリアルタイム伝送が可能である．

MEC ダイレクト＋ OpenVPN のネットワーク構成を図 6，図 7 に示す．5G 端末間通信を行うため，監視者側にも 5G ルータを搭載した．

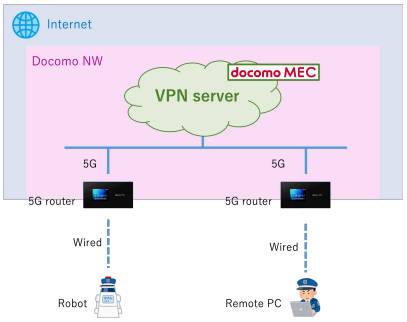

Fig.6 Physical network diagram of MEC direct + OpenVPN

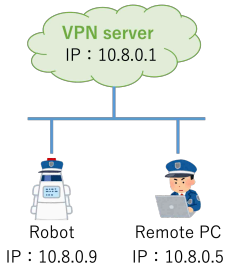

Fig.7 Logical network diagram of MEC direct + OpenVPN

4.3　MEC ダイレクト＋ VPN ルータ

上記 2 つのネットワークでは，VPN を実現するために OpenVPN を用いていた．OpenVPN を使用する際は，各 PC で VPN ソフトウェアを起動する必要があり，通信速度が PC スペックに影響を受ける可能性がある．また，通信経路としてサーバを経路する必要があり，遅延が増加する可能性がある．そこで，ロボットおよび監視者双方に VPN ルータを設置し，VPN 機能を外部ハードに任せることで，通信速度の安定化を図る．また，VPN サーバを経由する必要がなく，VPN ルータ間で直接つながるため，遅延の減少が期待できる．

MEC ダイレクト＋ VPN ルータのネットワーク構成を図 8，図 9 に示す．ロボット，監視者は VPN ルータを介して 5G ルータへ接続し，VPN ルータ間で VPN 接続される．L2VPN で接続すると，ROS2 通信が不安定であったため，この構成では L3VPN を用いる．ただし，L3VPN では，ロボットと監視者 PC のサブネットは異なる．

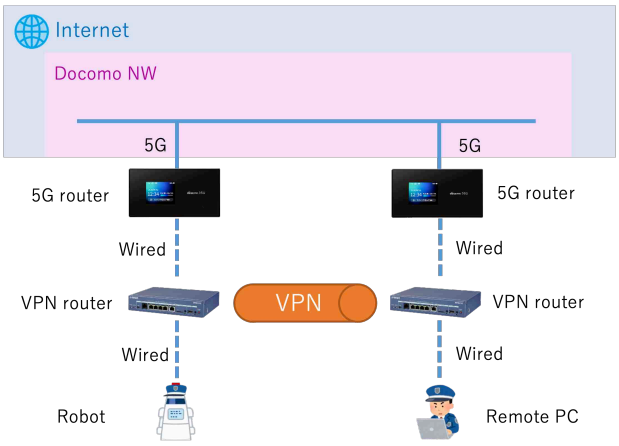

Fig.8 Physical network diagram of MEC direct + VPN router

ロボットと監視者のサブネットが異なる場合，そのままでは二点間で ROS2 通信を行うことができない．そこで，ROS2 通信に用いられている FASTDDS[2] の機能を用い，異なるサブネット間の ROS2 通信を実現した．DDS 設定の一部を Listing 1 に示す．通常 ROS2 では通信相手を同じ LAN 内でのみ探すが，initialPeersList で IP を指定することで，指定の IP の通信相手

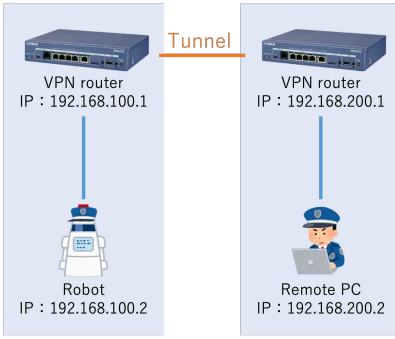

Fig.9 Logical network diagram of MEC direct ＋ VPN router

の探索を行うことができる．これにより異なるサブネットに存在するノードとの通信が可能になる．

Listing 1 DDS setting

```
<initialPeersList>
  <locator>
    <udpv4>
      <address>192.168.100.2</address>
    </udpv4>
  </locator>
  <locator>
    <udpv4>
      <address>192.168.200.2</address>
    </udpv4>
  </locator>
</initialPeersList>
```

また，initialPeersList を用いたとき，ノード通信が不安定になる問題が発生した．そこで，Discovery Server[3] を使用し，通信の安定化を図った．

4.4 通信速度

構築したネットワークそれぞれの通信速度の測定，比較を行う．

4.4.1 通常の 4G，5G の通信速度

参考として，4G，5G を通常利用した際の通信速度を表 1 に示す．通信速度の測定には，スピードテストサイト[1]を用いた．4G，5G ともに，ダウンロード速度に比べ，アップロード速度がかなり遅くなることが分かった．ロボットから監視者へのカメラ映像の送信には，アップロード速度が重要となる．

Table 1 4G, 5G communication speed

ネットワーク	Upload	Download
4G	18 Mbps	50 Mbps
5G	50 Mbps	300 Mbps

4.4.2 各ネットワーク構成の通信速度

各ネットワーク構成の通信速度測定結果を表 2 に示す．送信側をロボット，受信側を監視者 PC としている．OpenVPN を用いたインターネット VPN，MEC ダイレクト＋ OpenVPN は，通常 5G 利用時と比べ，かなり速度が遅くなった．また，ROS2 通信時，送信するデータ容量が二倍になる問題が発生した．これは通信の際，トピックが受信先だけでなく，サーバにも送られてしまっているからであると考えられる．一方，VPN ルータを使用した時は，通信速度は通常 5G 利用時と比べやや遅くなった程度であり，ROS2 通信時のデータ容量に変化は見られなかった．

[1]https://www.speedtest.net/ja

Table 2 Communication speed when using VPN

ネットワーク構成	Upload	Download
インターネット VPN	16.0 Mbps	13.4 Mbps
MEC ダイレクト ＋ OpenVPN	15.2 Mbps	18.4 Mbps
MEC ダイレクト ＋ VPN ルータ	44.0 Mbps	43.6 Mbps

5 実験

構築したシステムを用いて，映像配信実験，遠隔制御監視実験を行った．

5.1 映像配信実験

まず，開発したネットワークでカメラ映像配信が可能であるか確かめるため，映像配信実験を行った．暗視カメラは，解像度を 640×480 または 640×360，周波数を 30 fps に設定した．また，360 度カメラは 1920×960 (2K)，30 fps に設定した．結果を表 3，4 に示す．また，インターネット VPN、および MEC ダイレクト＋ VPN ルータ利用時の 360 度カメラ映像配信実験の様子を図 10 に示す．なお、MEC ダイレクト＋ OpenVPN 利用時は 360 度カメラ映像が配信できなかったので、図は省略している。

暗視カメラ映像はどの構成でも滑らかに配信できた．360 度カメラ映像は，インターネット VPN ではフリーズし，MEC ダイレクト+OpenVPN では 1 分ほど待ったが映像自体が送られてこなかった．一方，MEC ダイレクト＋ VPN ルータでは滑らかに配信できた．ただし，通信速度に対してデータ容量がぎりぎりのため，通信が不安定になると映像は停止した．通信が安定すると，再度映像は動き出した．MEC ダイレクト＋ VPN ルータで 360 度カメラ映像を配信した際の遅延は 284 ms であった．

Table 3 Streaming experiment (Night vision camera)

ネットワーク構成	解像度	結果
インターネット VPN	640×480	○
MEC ダイレクト ＋ OpenVPN	640×480	○
MEC ダイレクト ＋ VPN ルータ	640×380	○

Table 4 Streaming experiment (360-degree camera)

ネットワーク構成	結果
インターネット VPN	映像がフリーズした
MEC ダイレクト ＋ OpenVPN	映像伝送できなかった
MEC ダイレクト ＋ VPN ルータ	通信安定時：滑らかに配信可 通信不安定時：映像が停止

5.2 遠隔制御監視実験

開発した屋外監視移動ロボットとネットワークを用いて，遠隔から自律移動を制御，また，カメラによる周囲の様子の監視が可能であるか確かめるため，遠隔制御監視実験を行った．映像配信実験の結果から，ネットワークには MEC ダイレクト＋ VPN ルータを用いた．九州大学伊都キャンパス水素ステーション横の歩道で，約 150 m の自律移動を行った．この時，暗視カメラは 640×380 の 30 fps，360 度カメラは 1920×960 の 10 fps に設定

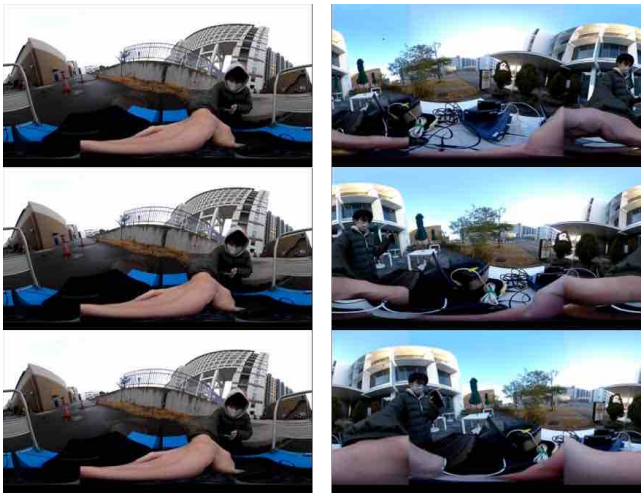

Fig.10 Streaming experiment of 360-degree camera images (left: Internet VPN, right: MEC direct + VPN router)

した．360 度カメラを 10 fps としたのは，ネットワークの通信速度が足りず，30 fps では制御信号・暗視カメラとの同時通信は厳しいと判断したからである．

実験の様子を図 11 に示す．左上が地図，左下が外部カメラによるロボットの移動の様子，右上が暗視カメラ映像，右下が 360 度カメラ映像である．ロボットが目標位置に向けて，自律移動を行い，その様子をカメラ映像を通して，監視者 PC で確認することができた．道中でカメラ映像が停止することがあったが，時間が経つと再度動き出した．

6 まとめ

本研究では，夜間に屋外のパトロールを行う遠隔監視ロボットシステムを開発した．ベースのクローラロボットに制御用 PC やセンサ類，暗視カメラ，360 度カメラ，5G ルータ，VPN ルータを搭載し，遠隔からの制御，監視が可能なシステムを構築した．実験では，公衆 5G 回線を利用したネットワークを用いて，360 度カメラ映像を 2K30FPS で伝送できることを確認した．また，九州大学伊都キャンパス内の歩道において，遠隔制御監視実験を行い，遠隔でロボットの制御，暗視カメラ映像および 360 度カメラ映像の伝送と監視ができることを確認した．

7 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] 川﨑 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”，第 *21* 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 *SICE-SI* 予稿集，pp.1779—1782，2020.

[2] “DDS API — Fast DDS 2.9.1 documentation”，`https://fast-dds.docs.eprosima.com/en/latest/`，Accessed on 03/02/2023.

[3] “16.2. Use ROS 2 with Fast−DDS Discovery Server”，`https://fast-dds.docs.eprosima.com/en/latest/fastdds/ros2/discovery_server/ros2_discovery_server.html`，Accessed on 03/02/2023.

Fig.11 Remote surveillance experiment