

トンネル内無人飛行船画像伝送

地下空間・狭隘空間における無人移動体通信技術

大津良司

洪水対策用地下トンネルが首都圏などで建設されている。トンネルは地下数十メートルと深く有毒ガス発生懸念から、日常および緊急時の点検が危険作業、苦渋作業になることが懸念されている。そのため、これらトンネルを安全に且つ効率的に点検する手法として無人飛行船利用が検討されている。しかし、トンネル内はカーブが多く閉鎖された空間の上、点検距離が長い場合無線通信を実現するには多くの課題があった。本稿では課題を解決して実現したトンネル内長距離無人移動体画像通信技術について紹介をする。

本技術は、トンネル内通信の他、地下街や狭隘空間など従来無線通信が困難とされていた空間での通信に応用可能な技術である。

キーワード：無線通信、画像伝送、トンネル、狭隘空間、点検、洪水、災害

1. はじめに

首都圏や近畿圏など大都市およびその周辺では洪水対策用として地下数十 m に洪水の一時貯水および放水用シールドトンネルが建設されている。これらトンネルは深度が深く、総延長距離が長い場合が多い。また、内部を土砂、岩石、流木などが洪水とともに流れ込むため、内部には破壊される可能性がある照明設備や電源設備が無い。さらに、流入した生物などの腐敗などで有毒ガスの発生や低酸素状態の危険性もある。これら過酷な環境下でも安全に且つ効率的に点検するために、無人機械を使った遠隔からの点検方法の検討が行われてきた。

無人機械の候補としてトンネル底部を走行する車両が検討されたが、地下トンネル底部には洪水が流入した時に堆積した土砂や流木などがあり移動が困難な場所もある。そのため障害物に影響されにくい無人飛行船を使った点検が検討された^{1), 2)}。

飛行船は飛行機やヘリコプターに比べ長時間の低速や定点の滞空飛行が可能という特徴があるため、これまでも災害地の被災状況を詳細に把握する手段としての研究が宇宙航空研究開発機構（JAXA）などで行われてきた（写真－1 参照）³⁾。

使用される軟式飛行船は一般的に機体は柔らかく竜骨を持たないため、トンネル内構造物に当たった場合でも、飛行船が墜落する、構造物を傷つけるなどの可能性が低いことからトンネル内の点検にはふさわし



写真－1 軟式無人飛行船（写真提供）宇宙航空研究開発機構

い。

また、無人ヘリや無人飛行機に比べ構造が簡単で低価格であることもあり、今後、地下街、狭隘空間など災害時に人が立ち入ると危険な場合やプラントや各種構造物など高所で人が近づけない場所の点検、監視などに注目されている。

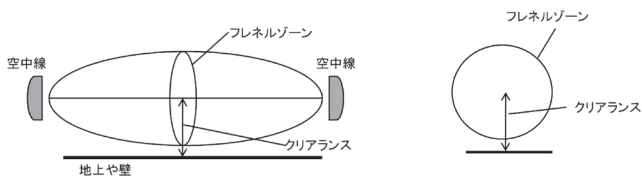
しかし、安全な地上などから無人飛行船を操作し、リアルタイムにトンネル内部の状況を把握するには無線を使った画像とデータ通信が不可欠である。しかし、トンネル内は無線伝送を行うには内径が狭く、カーブが多い閉鎖された空間のため長距離の無線通信は極めて困難である。

2. トンネル・地下空間など閉空間での移動体無線伝送の概要

(1) トンネル内の通信

電波は空中線（アンテナ）から広がりをもって放射

されている。パラボラアンテナや八木アンテナのように指向性がある場合でも電力損失を少なくし通信できる距離を長くするのは、送信アンテナと受信アンテナ間に直接的な見通しが有るだけでなく一定の範囲内に障害物が入らないようにしなければならない。図一1に示すように送受信間の最短点を結んだ回転楕円状の範囲をフレネルゾーンといい、障害物までの距離をクリアランスという。



図一1 フレネルゾーンとクリアランス

例えば、無線 LAN で使われる 2.4 GHz で 2,000 m の伝送を行った場合のフレネルゾーンの中央値半径は 7.9 m になる。この 60% が確保されていると自由空間とほぼ同等の伝搬特性になると言われているため、4.74 m の半径あればよいことになる。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の無人飛行船通信試験では、1.2 GHz 帯アナログ 1W 出力の無線機を使い無人飛行船と地上局間で 25 km 映像伝送に成功している³⁾。

この場合、中央値半径は 39.53 m、60% 値が 23.7 m になるため空中と地上局ではこれら値が確保しやすいため伝送が良好に行われることがわかる。

しかし、トンネル、地下空間および狭隘な空間では、例え見通しがある場合でもクリアランスが確保できず伝送距離は短くなることがある。

さらに、多くのトンネルは送信側と受信側に通しが無いため当初からフレネルを形成できない状態になっていることが多い。

(2) トンネル内無線伝送の課題

電波はトンネル内をどのように伝搬しているのか

ろうか。

電波は、トンネル内壁を反射しながら伝わっていく(図一2 参照)。

このとき、シールドトンネルのセグメント内壁は形状が複雑なため、さらに予想ができない反射をしていると思われる。

電波は反射により減衰をするとともに、複数の電波の到達時間が変わって何度も受信機側に届く。

そのため、受信機では同じデータを何度も受け取る事になる。また、電波は反射により位相がずれるため、他の電波と重なりその位相差により減衰をしたり強まったりすることを繰り返しながら進んで行く。

また、電波はアンテナの種類や設置方法により縦波(縦偏波、と横波(横偏波)もしくは渦巻き状(円偏波)で伝搬していく。一般的に無線 LAN や携帯電話は縦偏波を使っていることが多い。

例えば、縦偏波(大地に垂直)で発射された電波はトンネル内で反射を繰り返して行くうちに偏波面が変化していき、受信点では様々な角度を持って到達する。

受信側のアンテナはその偏波に合うように設置されているため、偏波が変わると受信面が小さくなり十分に受信できなくなる。

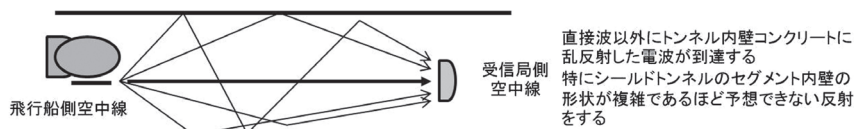
このように、トンネル内は十分な受信を妨げるいくつかの要因がある。

また、図一3に示すように飛行船が飛行することの位置の変化により時間的に反射や位相のずれ、偏波面の変化、激しい電界強度の変化が発生するため、受信を妨げることになる。

ましてや、図一4に示すようにまったくの見通しが無いトンネル内では、反射や回折を繰り返しながら伝搬する電波もあるがその多くもしくはほとんどは受信側まで伝わらない。

このような環境の中で通信を確立させるにはいくつかの検討が必要になる。

1) 高い周波数になるほど一般的には伝送距離が短くなる。そのため、低い周波数が使用できないか検討



図一2 トンネル内の電波伝搬のイメージ

直接波以外にトンネル内壁コンクリートに乱反射した電波が到達する
特にシールドトンネルのセグメント内壁の形状が複雑であるほど予想できない反射をする



図一3 飛行船移動による電波伝搬のイメージ

飛行船が飛行することで常時電波の発射場所が変化しているため、激しく電界強度は変化する



図-4 見通し外の電波伝搬のイメージ

を行う。但し、周波数が低くなると1秒間あたりに伝送できるデータ量が少なくなる(伝送速度が遅くなる)ため、画像データのような大きなデータが送れなくなっていく、もしくはリアルタイム性が失われていく。

2) 遠隔制御でモニターを見ながら移動体を操縦し周囲を確認する上では画像伝送のリアルタイム性を確保する必要があるが、トンネル内の不安定な通信環境では伝送量が制御データや音声データに比べ極めて大きい画像データでは、通信途中でデータの一部が欠損することにより画像を復元できなくなることが頻繁に起こる。そのため、画像データ欠損時に画像をデジタル化及び圧縮・伸張するエンコーダ、デコーダ及び無線プロトコルの各層で欠損データを修復する処理を繰り返しているリアルタイム性が失われていく。

これらのように、トンネル内の無線通信では無線伝送環境と画像伝送を行う上での機器で「無人移動装置」を遠隔から監視、制御する困難性がある。

3. トンネル内での無線通信を確立するための対応技術

(1) 試験場所の状況

首都圏外郭放水路内で行われた無線伝送試験結果について述べる。

首都圏外郭放水路トンネルは国道16号線直下に建設された台風や集中豪雨などで増水した河川の水を流入させ貯水、流下させる洪水災害の発生、拡大を防止する施設である。トンネルは国道下にあるが、各河川から洪水を取り入れる流入施設および洪水をトンネルに落下させる立坑は道路上に設置されない。そのため、トンネルは国道から一旦流入施設近くまで曲がり再び国道下に戻されるためカーブをしている。カーブはR250mなどであり、トンネルが国道に戻る部分の他、国道の形状に合わせて何か所かカーブがある。そのため、立坑と次の立坑間はまったく見通しが無い。

(2) 検討事項

本試験では、2つの立坑間約2,000mの無人飛行船と固定局間の移動体通信を確保し、無人点検を行うための無人飛行船に搭載したカメラ映像をリアルタイム

伝送を確立することを目標とした。

点検の条件は、①内部の変形及び亀裂が確認できること、②リアルタイムで状況が確認できること、③トンネル内部の改造・加工を行わないこと、の3点であった。

また、一般的な通信では、データが欠落もしくは不通状態になった場合に再送を行う。これが例えばインターネットによるパソコンでの通信であれば人はデータが表示されるまで待っている。しかし、無人移動体の画像伝送では、データが欠落もしくは不通状態による画像停止やモニターへの無表示状態、500msecを越える遅延、制御信号の途絶などは、状況を確認できないばかりか、無人移動体が施設や設備に衝突するなど事故になる場合がある。そのため、見通しが無いトンネル内であっても高い信頼性を実現する必要があった。

無線伝送設計において

- ①見通し外通信で安定した長距離通信を実現する方式選定
- ②トンネル内通信で発生するマルチパス、十分に確保できないフレネルゾーン対応策
- ③画像伝送のリアルタイム性実現と画質の確保対策
- ④無人飛行船搭載機器、アンテナの軽量化、小型化を考慮した検討を行った。

(3) 無線機器の選定

無線機器は、新たに無線局免許を取得することなく、国土交通省雲仙普賢岳無人化施工以降無人建設機械を始め無人建機や無人ヘリなど無人移動体に搭載しているIEEE802.11b.gによる1:1通信並びに無線メッシュルーターを使った無線メッシュネットワーク通信試験を行った。

①メッシュネットワーク

無線メッシュネットワークは、無線LANの複数のアクセスポイント(AP)間をメッシュ状に結び、アクセスポイント(AP)間で伝送路を構築する無線ネットワークである。複数の経路を確保できること、電界強度などを測定し自立的に通信路を確保できるなど移動体通信に期待できるシステムである。

しかしながら、試験を行った時点の機器はネットワーク構築する上で、複数の無線機を経由すると各無

線機のユニークデータが積分されるため、欲しい画像データ用のデータ量が多段的に中継するほど削られてしまい、大きな画像データを送ることができなかった。

また、期待した通信距離も短く、画像データのみならず 500 kbps 程度のデータ通信でも 500 m の通信ができなかった。

② IEEE802.11b.g 無線 LAN

IEEE802.11b.g 無線 LAN 装置は、本試験以前に先行した試験で、内径 3 m の共同溝シールドトンネルで約 1.5 km の画像伝送を実現していた実績があった。

本試験では、無人化施工に使われている画像圧縮伸張装置と無線機が一体化された伝送装置と他の無人移動体通信で使われている無線機と画像圧縮伸張装置が分離され、任意に選択できる装置 2 種類を使って試験を行った。また、データ伝送量を測定するための試験も併せて行った。

1) アンテナ選定

高い利得を得ることができること、半値幅が狭くトンネル内では直進性が有効に作用すると考えたパラボラアンテナ、パラボラアンテナより半値幅が広い八木アンテナ、さらに半値幅が広い平面アンテナを使い試験を行った。

結果、本トンネルにおいては、指向性が鋭く利得が大きいパラボラアンテナより八木アンテナでの通信が距離および移動体通信の安定性に優れていることがわかった。

これは、乱反射して拡散したエネルギーを指向性がパラボラアンテナに比べ鋭くない八木アンテナが受信できたものと考えられる。

また、八木アンテナは、1 本だけでなくアンテナ・ダイバーシティ構成も試した。

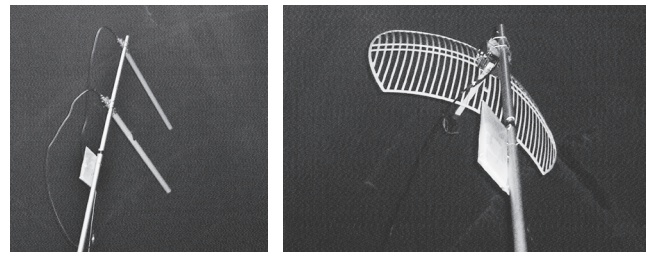
アンテナ・ダイバーシティは、相関のない複数のアンテナを設置し複数の電波伝播経路を確保することで、トンネル内で発生をしているマルチパスフェージングによる受信電力の落ち込みの影響を低減する方式である。

本試験では、アンテナを縦に設置する。横に設置する。偏波面を縦偏波と横偏波にするなどを行い、受信電力の変化を測定した。

結果、本試験ではアンテナを縦に設置して両方とも縦偏波にすることが比較的良好であることが確認できた。設置状況は、写真—2 を参照。

試験の詳細は、次の通りである。

1 次試験により、八木アンテナを用いることにより立坑から約 1,200 m 程度の映像伝送が可能であることを確認している



写真—2 トンネル内 八木アンテナのダイバーシティ設置状況およびパラボラアンテナ

その結果を受けて、飛行船に搭載する制約から軽量であるループアンテナの性能確認および八木アンテナの性能を再度確認した。

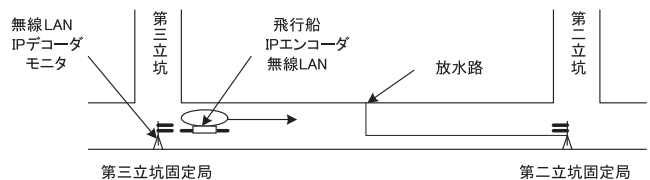
アンテナの特性を表—1 に示す。

表—1 アンテナの特性

項目	27 素子八木アンテナ	15 素子ループアンテナ
利得	18.5 dBi	17 dBi
放射パターン	半値幅 約 20°	半値幅 約 30°
質量	約 1.1 kg	約 0.4 kg

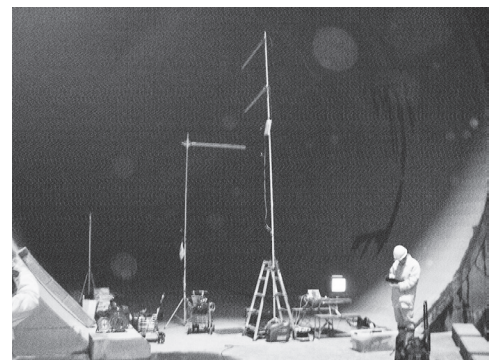
1 次試験の結果から 1,200 m 程度の伝送が可能であり、第二立坑と第三立坑の距離が約 1,900 m であることから第一立坑と第二立坑の両側からカバーすることにより放水路全長がカバーできる構成とした。

試験全体構成を図—5 に示す。



図—5 試験全体構成図

また、固定局の測定状況を写真—3 に示す。



写真—3 固定局の測定状況

固定局はまずは第三立坑下トンネル入り口付近および第二立坑下トンネル入り口付近に設置した。ここで、

アンテナ種別の選定およびダイバーシティ効果測定、偏波面変更、アンテナ設置高さの調整を行った。また、固定局位置を立坑直下、トンネル入り口、トンネル内と変えて受信状況を測定した。結果、八木アンテナを縦のダイバーシティ構成にし、偏波面は縦偏波で揃え、アンテナ位置はトンネル内部、トンネル半径の高さが一番受信電力が強いことがわかった。なお、アンテナの位置は飛行船飛行の邪魔にならないようトンネル底部中央に置かず、端に置いたが中央部設置と受信電力に大きな違いは無かった。

試験の機器系統図を図-6に示す。

機器は固定局に2.4GHz無線LAN装置、画像伸張用デコーダ、テレビモニターを設置した。デコーダは画像圧縮率の違いによる映像化の違いを確認するためMPEG2、MPRG4の装置を準備した。画像圧縮技術は日進月歩で進んでいるため、現在は移動体通信にはH264などさらに圧縮率の高い装置を用いている。

飛行船側は、全ての装置を12Vリチウムバッテリーで駆動させるようにし、各固定局に向け通信できるようにアンテナは機体の前後に向けてそれぞれ設置した。

エンコーダは重量を抑えるため、MPEG2 一台、MPEG4 一台のエンコーダを搭載した。デコードは固定局側でMPEG2、MPRG4の切り替えを行った。

飛行船への機器搭載状況を写真-4に示す。棒状に輪がぶらさがって見えるのがループアンテナと呼ばれるアンテナである。

固定局のアンテナは1次試験にて特性の安定していた27素子八木アンテナとしている。

なお、偏波は飛行船の尾翼が垂直に配置されているため、水平偏波としている。

上下方向のダイバーシティ構成にて、移動局のアンテナとの受信感度が優れるアンテナと通信可能とする構成にしている。

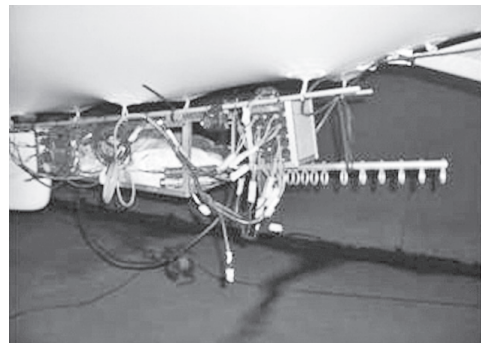


写真-4 飛行船への無線装置・アンテナ取り付け状況

2)無線機器及び画像圧縮伸張装置(エンコーダ, デコーダ)の選定

無人化施工で使用しているIEEE802.11.b無線機と画像圧縮装置一体型システムと無人ヘリや他の移動体で使用している無線装置と画像圧縮装置分離型システムを使った試験を行った。

無人化施工用装置は画像圧縮方法がMPEG2であり画像データ量が大きく、通信環境が厳しい本トンネル内では通信距離が不安定であった。

一方、分離型の場合、画像圧縮方法をMPEG2、MPEG4の異なる装置を選択できるため、データ量を変え安定した通信を行える目安を確認できた。圧縮レートは映像伝送の安定を優先して2Mbpsの設定としている。

(4) 試験結果

①アンテナの種類(ループアンテナと27素子八木アンテナ)

飛行船に搭載するアンテナについて、ループアンテナと27素子八木アンテナの2種類の試験を行い、27素子八木アンテナのほうが放水路長手方向に安定していることが確認できた。

なお、固定局は放水路中心位置にアンテナを設置し

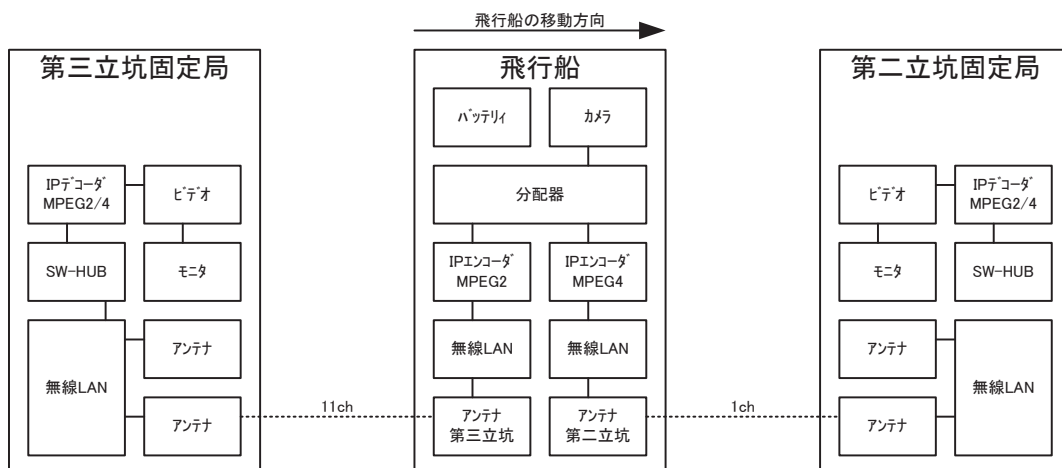


図-6 試験の機器系統図

ている。

距離表示が不正確であるが、ループアンテナの場合は第三立坑から約 800 m 付近から断続的に映像の停止が確認された。また、八木アンテナの場合は第三立坑から約 1,000 m 付近から断続的に映像の停止が確認された。

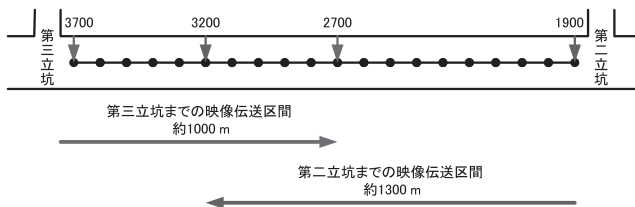
②固定局の設置位置（放水路中心と放水路脇）

実用化に向けて、立坑の上部から飛行船と固定局のアンテナをおろす構成が想定されることから、固定局の設置位置について放水路中心と放水路脇の 2 カ所として試験を行い、固定局の設置場所による大きな差は認められなかった。

③第三立坑と第二立坑からの距離

今回、第三立坑方向と第二立坑方向の両方にて全体をカバーする構成で試験を行っている。

距離表示と映像伝送可能あった区間を図一七に示す。



図一七 第三立坑と第二立坑の映像伝送可能区間

放水路の区間として最長の約 1,900 m 区間にて、両側の立坑から放水路全区間の映像伝送が可能であることを確認した。第三からの映像伝送エリアと第二からの映像伝送エリアの差は、1 つは IP エンコーダの MPEG2 と MPEG4 の差がある。設定上 MPEG2 は 2 Mbps 固定設定となるが、MPEG4 はもともとインターネット等の帯域の狭い通信インフラで利用することを目的として開発されているため、無線 LAN の帯域が 2 Mbps を下回った場合に、ビットレートを落として映像伝送することを優先する仕様であり、MPEG2 より通信可能区間が長くなった理由が挙げられる。また、電波の受信感度からも第三よりも第二のほうがよいことから、第二からの電波の伝播状況がよかった理由も挙げられる。電波の受信感度のよかった理由については、放水路は直線でなく曲がっていることから伝播状態が異なることは明らかであるが、トンネルカーブが伝播にどのように影響するかについては不明である。

(5) 飛行船搭載機器の重量

飛行船の設計に関わる、今回試験を行った最終構成の機器重量を以下にまとめる。

なお、MPEG2 エンコーダについては、軽量化のため銅製ケースを外し基板をポリエチレン袋に搭載している。

機器名称と重量を表一 2 に示す。

表一 2 飛行船搭載機器の重量表

名称	質量 (g)	数量	小計 (g)
27 素子八木アンテナ	1100	2	2200
同軸ケーブル	250	2	500
変換ケーブル	100	2	200
ブリッジ本体	500	2	1000
IP-エンコーダ (MPEG2)	200	1	200
IP-エンコーダ (MPEG4)	660	1	660
ビデオ分配器	110	1	110
DC12 V バッテリー	980	1	980
その他ケーブル類	200	1	200
合計			6050

4. トンネル内の無人飛行船のカメラ撮像

(1) カメラ

カメラおよびモニターの走査方式にはプログレッシブ走査方式とインターレス走査方式がある。

プログレッシブ走査方式は、画面上部から順次走査していく方式で、一方インターレス走査方式は走査線の偶数を走査し、その後奇数を走査していく方式である。

動きがある移動体からの撮像では細部を監視するには一般的には同じ画素数であればプログレッシブ走査方式の方が鮮明に映像を見ることができる。シールドトンネル点検システムなど移動体での撮像に用いるカメラはプログレッシブ走査方式が望ましい。

また、暗い場所での撮像を行うため、カメラの仕様で最低被写体照度を確認する必要がある。このとき、夜間モードなどで蓄光型は一定時間 CCD や CMOS に光を集めて撮像をする方式のため移動体撮像には適しない。

(2) 照明

トンネル内や閉空間で亀裂やヒビなど細部をカメラで撮像する時には、照明が必要になる。一般的なカメラ用のライトや工事用のライトでは光にムラがあり撮像をしたときに細部を確認する事が難しい場合が多い。

このような時には、面を均等に照らす事ができる工場の製品検査用 LED 照明が有効である。検査用 LED 照明にはカメラに着けるリング型や平面型などがあり、照明機器の専門メーカーもあるため、点検・撮像をしたい対象により相談をしながら選定を行うことが可能である。

(3) 画像鮮明化技術

画像処理技術の進歩は近年めざましい。従来であればリアルタイムで処理が難しかった暗い場所や霧の中、逆光などの撮像環境が悪い中で、動画におけるコントラスト改善をリアルタイムで処理することを目的にした技術が開発されており、今後、建設分野でも応用範囲が広いと思われる。

写真—5に示すように、左の元画像では捉えることができないトンネル奥の状況が処理後では明確に見て取ることができるようになっている。

これをリアルタイムに処理するため、飛行船搭載の他トンネル内や夜間の現場監視などに利用は可能である。



元画像

処理後の画像

写真—5 リアルタイム画像改善技術

5. トンネル内の無人飛行船の位置認識技術

操作室で伝送されてきた画像を確認する場合にモノトーンの特徴のないトンネル内壁を見ていると、撮像場所を特定することは困難である。現場ではトンネル内壁に位置を示す数字が大きくペイントされていたが、洪水の土砂で汚れていることもありカメラライトで照射された映像では判別することができなかった。

そのため試験では、パッシブ型（電波出力型）のRFIDタグを使い試験を行った。飛行船に受信機を取り付け、トンネル内に一定距離間隔でRFIDタグを設置した。

飛行船が飛行する時にタグのIDを読み取ることで飛行船位置を認識し、トンネルのどの位置を撮像しているか確定することができた。

6. 無人飛行船およびトンネル内無線画像伝送技術の展開

本研究により、無人飛行船トンネル内無線画像伝送が一定の距離であれば行えることがわかった。本技術は、シールドトンネル内の点検システムとしての利用のみならず、シールドトンネル建設時や推進機を使ったヒューム管下水道建設時の監視や状況把握、災害時

の地下空間の状況把握などや一般の道路・鉄道トンネルのクラック発見など日常点検の他、既に宇宙航空研究開発機構（JAXA）などで研究が行われている災害地を子細に撮像するなどに展開が可能である⁴⁾。

特に、無人飛行船は東京電力福島第一原子力発電所事故のような人が立ち入れない場合の定点での状況把握用途に有効と思われる。また、本事故でロボットが発電設備内に状況調査で入っていったが、狭隘な空間で無線通信が十分に行えなかった。今後、廃炉に向けた取り組みでは本試験で得られた無線伝送技術の知見が使えるのではないかと考える。

7. おわりに

無人飛行船を空ではなくトンネルの点検に使おうと考えた国土交通省殿および日本建設機械施工協会施工総合研究所殿の発想力に敬意を表する。それを実現するには飛行船の開発の他、先行研究が少なく、理論だけでは実現できないトンネル内無線通信技術の確立が必要であった。

幸い、長崎県雲仙普賢岳や北海道有珠山などを始め数多くの無人化施工用無線技術、シールドトンネル内無線伝送技術、無人ヘリ画像伝送及び制御用ローミング技術、ロボット用技術など長年研究してきた移動体用無線技術で解決ができた。

今後も培ってきた技術で社会に貢献していきたいと考えている。

JCMIA

《参考文献》

- 1) 渡部 修(国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所), 二瓶正康(国土交通省 関東地方整備局 江戸川河川事務所), 安井 成豊(㈱日本建設機械化協会 施工技術総合研究所) 29. シールドトンネル点検システムの開発 ㈱日本建設機械化協会 平成17年度論文集 p.147
- 2) 安井成豊(㈱日本建設機械化協会 施工技術総合研究所) 飛行船を利用したシールドトンネル点検システムの研究開発 ㈱日本建設機械化協会 建設の施工企画, p.68～69, 2005年11月号
- 3) 「災害監視用無人飛行船の飛行試験について」河野 敬, 松田幸雄, 奥山政広, 中館正顕(宇宙航空研究開発機構) 友井康人(航空宇宙技術振興財団) 日本航空宇宙学会 第47回飛行機シンポジウム講演集, p.571～576, 2009年11月4日
- 4) 「小型無人飛行船の地上運用性改善に関する研究」河野 敬, 中館正顕, 奥山政広, 都甲章己(宇宙航空研究開発機構) 友井康人(航空宇宙技術振興財団) 日本航空宇宙学会 第48回飛行機シンポジウム講演集, p.409～413, 2010年11月30日

【筆者紹介】

大津 良司 (おおつ りょうじ)
知能技術㈱
代表取締役

