

小口径下水管内における SRT ベースの協調映像伝送プロトコルのデータ転送性能

立花 誠也¹ 石原 進¹

概要：筆者らは、短時間・低コストの下水管検査手法として、浮流無線カメラ端末を用いた省力下水管検査を提案している。安田らは小口径下水管内における無線 LAN 映像伝送 UDP ベースプロトコル SVTP (Sewer Video Transmission Protocol) を開発しているが、現段階の SVTP の実装は本手法において想定している浮流ノードから AP への転送データ量を実現できていない。これまでの研究により下水管内において無線 LAN 通信によりデータを転送する際に高信頼性 UDP ベースプロトコルである SRT (Secure Reliable Transport) の使用が有用であることがわかった。そこで本稿では、複数台のデータ送信機の協調通信の機能を備え、データ通信を SRT で行う下水管内映像伝送プロトコル SVTP2022 の実装を小口径下水管内における通信性能を調査した結果を報告する。直径 200 mm 塩ビ管内において、5GHz 帯 IEEE 802.11n を使用し、データ送信機が浮流しながら固定された AP へのデータ転送実験を行った結果、SVTP2022 は 56 MB のデータを送信することができた。56 MB は、720p, 30fps, 可変ビットレートの映像品質で撮影した下水管内映像の約 264 秒分に相当し、流速 0.3 m/s で計算すると一般的なマンホールの設置間隔の最大値である 80 m の映像データを送信可能であることがわかった。

Performance Evaluation of data Transmission of SRT-based Cooperative Video Transmission Protocol in a narrow sewer pipe

1. はじめに

日本の下水管の多くが老朽化しており、計画的な修繕のために下水管検査の効率化が急務である。現行の下水管検査では、目視による確認 [1]、管口カメラ [2] や有線ロボットを用いた検査 [3] などが主に行われているが、これらの手法は、多大な人的・金銭的・時間的なコストを要し、実施は容易ではない。特に、修繕の必要性を判断するためのスクリーニング検査においては、人的・時間的・金銭的なコストの小さい下水管検査手法が必要である。

石原らは、安全で低コストな下水管検査手法として、浮流無線観測機を用いた下水管検査システムを提案している [4] (図 1)。本システムでは、下水管内に複数投入したカメラ付き浮流観測ノードが撮影した管内映像を、マンホール下に固定したアクセスポイント (AP) へ無線 LAN 通信を介して回収・閲覧することで検査する。しかしなが

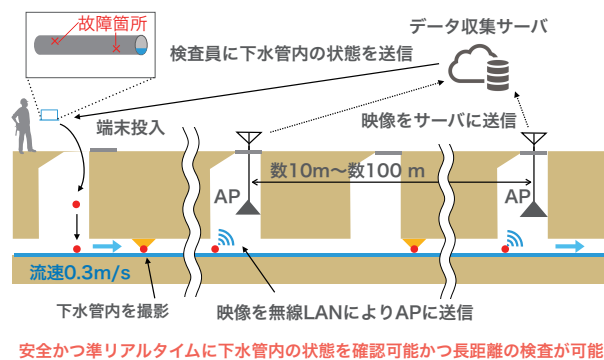


図 1 浮流型無線カメラを使用した下水管検査手法

ら、検査の対象としている小口径下水管内では、下水管外の土砂や下水管内の汚水等により十分な見通しが確保できず、口径 200–250 mm 程度の下水管内では 5 GHz 帯 IEEE 802.11n 規格を使用した際の通信可能距離が高々 10 m に制限されることが実験により確認されている [6]。

これまでに安田らは下水管内映像を浮流ノードから AP へ欠けなくデータを伝送するための UDP ベースの再送制御つきデータ転送プロトコル SVTP2019 (Sewer Video

¹ 静岡大学
Shizuoka University, 3-5-1, johoku, nakaku, Hamamatsu,
Shizuoka 432-8561, Japan

Transmission Protocol)を開発してきた[5]。本プロトコルは、下水管内で浮流状態の観測機と固定されたAPが通信する場合、通信距離及び通信時間が大きく制限されることに着目し、SVTP2019では、欠けなくAPが回収できる映像データ量を増やすために、フレームアグリゲーションを考慮したパケットサイズの設定や通信品質が悪い状態におけるデータ送信の抑制など様々な工夫がなされている。SVTPでは、通信の信頼性を保証するが、トランスポート層にTCPではなくUDPを使用する。これはTCPでのロススペースの輻輳制御に伴うデータ転送レートの減少を避けるためである。下水管内での接続初期の不安定な無線リンクの状態に起因するパケットロスによりTCPの輻輳ウィンドウが減少すると、通信相手への接近時にリンク品質が向上しても、通信リンクの性能を十分利用できなくなる。UDPの利用によりSVTPではこれを防ぐ、

しかしながら、現段階のSVTPの実装では $\phi 250$ mm 鉄筋コンクリート製下水管内において2.4GHz帯IEEE 802.11nを使用した場合、一度のAPとの通信機会において転送可能データ量が約20MBにとどまる[7]。小口径下水管内の端末間距離に対するスループットの調査の結果、5GHz帯IEEE 802.11n, MCS7を使用した場合に端末間距離10mにおいて、約50Mbpsのスループットを獲得することがわかっている[7]。この結果から転送可能データ量を概算すると、下水管内の一般的な流速0.3m/sの場合、66秒程度の通信可能時間に400MB程度のデータが送信可能と見積もっている。この調査では、下水管内に水は存在せず送信機が浮流していないため、水位や流速の違い等により見積もった転送可能なデータ量は小さくなると予想できるが、現状のSVTP2019の転送可能データ量は大幅に小さく、性能向上の余地がある。

筆者らはこの原因が独自に実装している再送処理の部分にあると考え、この再送処理の変更により、データ転送量を向上できると考えた。そこで、SVTP2019と同様にUDPベースで再送処理が実装されているデータ転送プロトコルSRT(Secure Reliable Transport)[10]に着目した。SRTはモバイル環境において高画質な映像を伝送するために開発され、端末移動に伴うネットワークの状態の急変に対応するため、10msごとの受信側からのフィードバックなどの工夫がなされている。

筆者らは小口径下水管内における浮流状態のデータ送信機から固定されたAPへのすれ違いの際の転送データ量に関して、TCP, UDP, SRTの比較調査を行った[8]。直径200mm塩ビ管において5GHz帯IEEE 802.11n規格を使用し、バルクデータ転送実験を行ったところ、再送処理を伴わないUDPでは約72MB, SRTは約67MB, TCPは56MBのデータの伝送に成功した。その結果、SRTの使用によりデータ転送可能量向上が期待できることがわかった。

本稿では、SRTを用いたSVTPの改良版(SVTP2022)

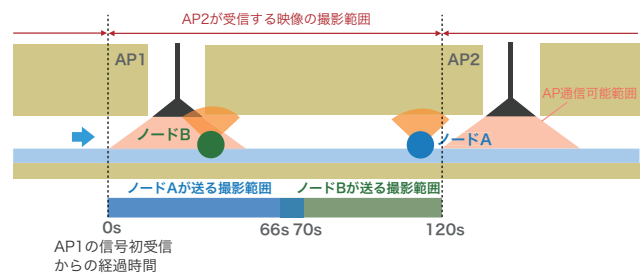


図2 SVTPにおける協調動作

の設計・実装、並びに $\phi 200$ mm 埋設塩ビ管において実施したデータ伝送実験について報告する。また、この結果よりSVTP2022のデータ転送性能について論じる。以降、第2章では、これまでに開発されたSVTP2019についてまとめ、第3章で、SVTP2022の設計・実装について述べる。第4章では、本稿のために実施した実験の概要と結果を述べる。第5章で本稿をまとめる。

2. 小口径下水管内映像伝送プロトコルSVTP2019

2.1 基本設計

SVTP2019は、トランスポート層にUDPを採用し、アプリケーション層において再送機能を備えることにより映像データの確実な伝送を目指し設計されてきた。一般に、送信・受信データの欠損を許容できない場合においては、トランスポート層プロトコルとして通信信頼性の保証や輻輳制御の機能を持つTCPが広く用いられている。TCPは本来複数の浮流ノードを経由する有線ネットワークでの使用を想定して開発されているため、輻輳制御などの機能を備えている。TCPの輻輳制御はマルチホップの有線ネットワークで生ずる輻輳を想定して設計されており、多くの実装ではパケットロスの検出後、送信レートを大幅に低下させる。輻輳とは関係なく無線リンク上のエラーでパケットが失われる場合、ならびに本システムで浮流ノードがAPに接近する場合のようにリンク品質が短時間に大きく変動する場合には、TCPのロススペースの輻輳制御により大きく性能が低下する可能性がある。そのため、SVTP2019では、トランスポート層にTCPではなくUDPを使用し、アプリケーション層で再送機能を実装している。

またSVTPでは、APへ転送可能な映像データ量を向上するために、複数台の浮流ノードを使用して映像を転送する。図2のように複数の浮流ノードを用いて大容量データを転送するために、浮流ノードは接続が切れたAPから次に遭遇するAP間で撮影された映像をAPへ送信し、先行する浮流ノードが既に送信済みの映像が撮影された検査範囲以外で撮影された範囲の映像を送信する。各浮流ノードの送信データの映像範囲が重複しないように制御することにより各浮流ノードが送信した断片的な映像を結合して、検査範囲全体の映像を得ることができる。浮流ノード

が AP との接続機会に送信可能なデータ量が制限される。そこで、大容量なデータを伝送するためにこのように複数ノードが分割してデータ送信を行う。

SVTP2019 では、検査範囲全体の映像の確実な回収、及び浮流ノードから AP への転送可能データ量の確保のために、以下のような様々な工夫がなされている、

- (1) アプリケーション層における再送処理
- (2) 映像データ未回収範囲の検出
- (3) 複数ノードによる AP への同時送信の抑制

2.2 アプリケーション層における再送処理

浮流ノード・AP 間の再送処理は、アプリケーション層において次のように実装されている。浮流ノードが映像データを AP に送る時、UDP ペイロードの先頭の 2 bytes をシーケンス番号として割り当てる。浮流ノードは送ったメッセージのシーケンス番号に対応する確認応答 (ACK) を RTO(Retransmission Time Out) 内に受信できない場合、メッセージを再送信する。現状の SVTP2019 では、浮流ノードの RTO は 60 ms で固定されており、浮流ノードの最大再送回数は 4 回に設定されている。また、AP が浮流ノードからのデータ送信を待つタイムアウト時間は 300 ms に設定されている。これらの値の設定は安田らの実験結果に基づく。水の無い直径 200 mm 塩ビ管内においてデータ送信端末を毎秒 0.3 m/s で移動させながら、2.4GHz 帯 IEEE 802.11n 通信によってデータを転送する実験を行ったところ、これらの設定値を用いた際にタイムアウトが頻発せず、最も高いグッドプットが得られている [5]。

2.3 映像データ未回収範囲の送信

浮流ノードは、AP が 300 ms ごとにブロードキャストする UDP ビーコンパケットを受信することにより、自身が AP の通信範囲に入ったことを検知する。このビーコン間隔は約 10 cm の浮流ノードの移動時間に相当する。浮流ノードは各 AP から信号を初めて受信した位置から、次の AP の信号を受信するまでの下水管検査範囲をセグメントとして区切る。浮流ノードは i 番目の AP_i に対して $i-1$ 番目のセグメント S_{i-1} で撮影された映像のみを送る。浮流ノードは映像を 4 秒程度の短い時間単位で保存し、その映像の撮影開始・終了時のタイムスタンプを記録しておく。各浮流ノードが一定の速度で流れると仮定すると、各 AP から最初に信号を受信してから経過時間と映像の撮影開始・終了時のタイムスタンプとの時間差から映像撮影位置を推定できる。AP は、ビーコンパケットに映像未回収範囲の情報を付加する。浮流ノードはそのビーコンパケットを受信することにより、映像未回収範囲を検出し、AP へ映像未回収範囲の映像を送信する。

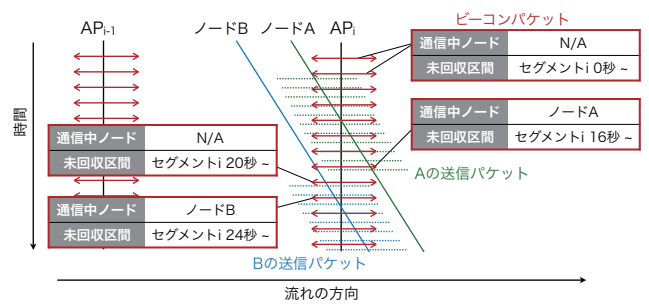


図 3 SVTP2019 における同時送信の抑制

2.4 複数ノードによる AP への同時送信の抑制

図 3 に SVTP の同時送信の抑制を示す。複数の浮流ノードが同時に 1 つの AP と通信可能になった時、浮流ノード同士が隠れ端末の関係にあると、複数の浮流ノードが同時にフレームを送信することが考えられる。この場合、互いの信号が衝突するため、正しいフレームを受信できない。SVTP では、AP が発するビーコンパケットを利用することにより隠れ端末問題等に起因する複数の浮流ノードの AP への同時送信及びスループットの低下を防いでいる。

複数の浮流ノードと AP は以下のように動作する。下水管内には、先発浮流ノードであるノード A と、後続するノード B が浮流していると仮定する。ノード A は、 AP_i が発するビーコンパケットを受信すると、ビーコンパケット内のデータより AP_i の映像未回収範囲を検知し、次に送る映像データを決定する。ノード A は、 AP_i に自身の ID とこれから送る映像の撮影範囲・データ量を制御用メッセージとして送った後に、映像送信を開始する。 AP_i は、ノード A から映像を受信している間、ビーコンパケットに現在通信中であるノード A の ID を付加する。後続ノード B がノード A と通信中の AP_i のビーコンパケットを受け取ると、ビーコンパケット中にノード A の ID が記されていることから、 AP_i が他の浮流ノードと通信中であると検知できる。この時ノード B は、 AP_i への映像送信を保留する。 AP_i は、ノード A からのパケットを一定時間受信できなければ、ノード A が自身の通信可能範囲内に存在しないと判断し、ノード A との通信を打ち切る。また、以後のビーコンパケット中にはノード A の ID を付加しない。ノード B は、他の浮流ノードの ID が付加されていないビーコンパケットを受け取ることにより、現在 AP_i と通信中の浮流ノードは存在しないと判断し、映像の送信を開始する。

2.5 SVTP2019 におけるデータ転送

SVTP2019 での基本的なデータ転送の流れを図 4 に示す。直径 250 mm のヒューム管内での無線 LAN の受信信号強度は、通信距離の増加とともに周期 80 cm 程度で周期的に増減を繰り返しながら減少することが川合らの調査によりわかっている [9]。このような信号の強度の変化に対応するように、安田らは浮流ノードから AP のデータ転送

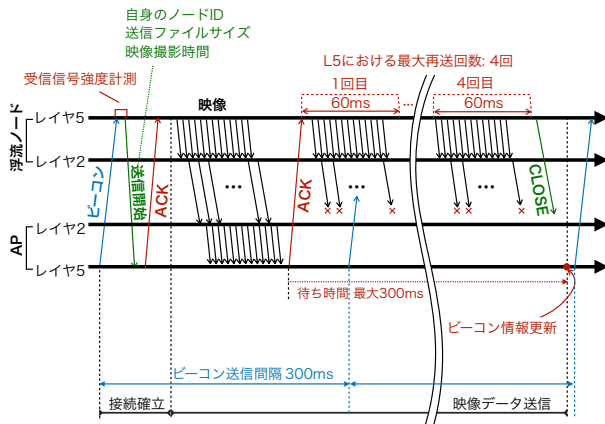


図 4 SVTP2019 のデータ転送の流れ

開始タイミングに対して、RSSI による閾値を設け、通信状態が良好になってからデータ転送を行う機能を実装している [5],

浮流ノードは、AP からのビーコンパケットの RSSI を計測し、測定した RSSI が起動時に指定した下限値以上かを調べる。RSSI が指定値未満であれば、浮流ノードは映像データを送らない。RSSI が下限値以上であることを浮流ノードが確認した場合、浮流ノードは、自身の ID とこれから送る映像の撮影時間を制御メッセージに格納して AP に送る。

制御メッセージを受け取った AP は、正しく受信したことを示す ACK を返す。浮流ノードは ACK を受け取ると、映像データを 7392 byte 分読み出す。浮流ノードは読み出した映像データを UDP 通信により AP に送る。浮流ノードは、AP からこの送信に対しての ACK を受け取ると、次のチャンクを読み出して AP に送る。これを繰り返すことで、浮流ノードは AP に映像を送る。

生成された動画はビットレート 2.5 Mbps, フレームサイズ 1280×720, 30 fps, H.264 形式で符号化し保存される。浮流ノードは 2 秒単位で生成された動画データを一つのチャンクとして送信を開始する。浮流ノードと AP 間のスループットを測定するために浮流ノードは分割した最初のチャンクを送信開始した際の時刻をログファイルに記録する。浮流ノードは AP から ACK を受け取ると、その時刻をログファイルに記録する。浮流ノードは送信開始の時刻と ACK を受け取った時刻の差分をとり、その差分と送信した 2 秒単位の映像のデータサイズからスループットを計算し、ログファイルに記録する。また、AP は動画の最初のチャンクを受け取った際の時刻と 2 秒分の動画を受信し終わった際の時刻をログファイルに記録する。

3. SVTP2022 の設計

SVTP2019 の実装に基づく実験では、浮流ノードから AP への一度の遭遇機会における転送可能データ量は期待

よりもはるかに小さなものしか得られなかった。筆者らはこの原因が独自に実装された再送処理の部分にあると考え、この再送処理を修正により、データ転送量向上が見込めると考えた。そこで、UDP ベースで再送処理が実装されているデータ転送プロトコル SRT に着目し、これをデータ転送部分に使用することにした。SRT はモバイル環境において高画質な映像を伝送するために開発され、端末移動に伴うネットワークの状態の急変に対応するため、10 ms ほどの受信側からの現在のバッファサイズや RTT 等の情報を含んだフィードバックを送り、送信側はそのフィードバックをもとに送信レートの調整などのネットワーク状態に柔軟に対応するような工夫がなされている。

3.1 UDP ベースのデータ転送プロトコル

TCP に依存しない UDP ベースの信頼性のあるトランスポートプロトコルが様々開発されている。RBUDP (Reliable Blast UDP) は高帯域・高遅延ネットワークでのスループット向上を目的として開発されたプロトコルである。RBUDP では事前にユーザーがネットワークの帯域幅を調べ、その帯域幅を最大限使用するようにユーザー自身が送信レートを設定する。再送処理は NACK に基づいて行われる [11]。QUIC は TCP の代替として Google が開発しているプロトコルである。QUIC は 1 つの接続において複数のストリームを並行して通信することによって Head of Block の問題を解消し、スループットを向上する [12]。UDT (UDP-based Data Transfer) は高帯域遅延ネットワークにおいて帯域を効率的かつ公平に利用することを目的に開発されたもので、帯域幅の測定に基づく輻輳制御、RTT とパケット到着量に基づくフロー制御を行う [13]。Tsunami UDP は高帯域高遅延ネットワークでのスループット向上を目的に設計された [14]。SRT はリンク品質が悪く、ネットワークの環境を予測しづらいような状況においても高画質な映像を途切れることなく伝送することを目的に開発されている [10]。以下、SRT について説明する。

3.2 SRT

SRT (Secure Reliable Transport) はモバイル通信のような通信者の移動などによって通信リンクの品質が急変し、ネットワークの帯域幅や遅延、ジッタなどの変化が予測不可能なネットワークにおいて安定して高画質な映像を遅延を少なくストリーミングするために開発された通信プロトコルであり、UDT をベースとしている [10]。SRT では、高速な UDP データ送信にエラー訂正機能を組み合わせることで、ネットワークの品質に関係なく、信頼性の高い低遅延のストリームを提供することができ、SRT は、最大 10% 程度のパケットロスに対しては劣化が発生しないほどの耐性を持っている。SRT には、パケットロスの回復、

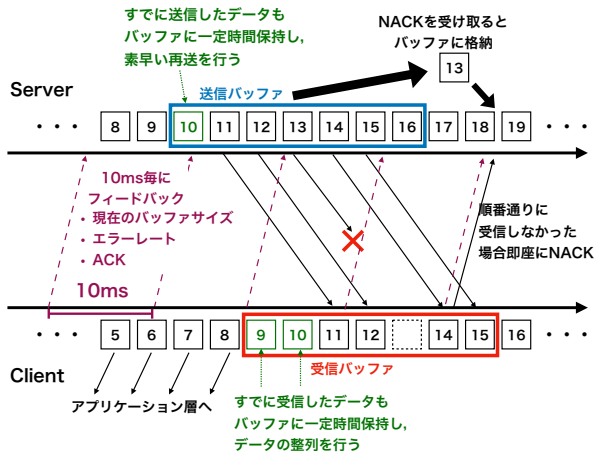


図5 SRTの送信の流れ

ファイアウォールトラバースの簡素化、エンドツーエンドのセキュリティのためのストリームを暗号化する機能などの機能がある。SRTはストリーミングのモードの他、ファイル転送モードも備えている。

基本的なSRTのデータ転送の流れを図5に示す。受信側は、送信されたデータのシーケンス番号に基づいて、受信データの「抜け」が検出された場合、即座に送信側に対してNACKメッセージを送信する。またSRTでは、受信側が10ms毎にデータ送信側に対してACKメッセージを送信する。データ送信側はこのACKに対するACKメッセージ（ACKACK）を遅延なしに送信する。データ受信側はACKを送信した時刻とACKACKを受信した時刻からネットワークのRTT（Round Trip Time）を計算する。このACKにはエラー率、送信に成功したデータのシーケンス番号、RTT、現在の受信バッファサイズの情報が含まれている。これにより、送信側は、受信バッファの状況、ネットワークの遅延、パケットエラー率を把握することができる。SRTにおける輻輳制御は、送信レートのコントロールと受信側が計算するウィンドウサイズの調整によって行われる。送信レートの上昇はNACKを受信しなかった場合、10msごとに(1)の式で得られるincの数だけ、次のACK受信時まで（約10ms間）送信するパケットの数を増やす。

$$inc = \max(10^{(\log_{10} B)-9}, 1/1500) \times 1500/MSS \quad (1)$$

ここで、MSSはMaximum Segment Sizeであり、 B は測定されたネットワークの帯域幅である。また、NACKを受信する毎に送信側は(2)式を基にして、送信レート R_i を減少させる。

$$R_{i+1} = R_i \times \frac{8}{9} \quad (2)$$

ウィンドウサイズの調整は、ACKを返すタイミングで(3)式によって計算され調整される。

$$W = W \times a + AS \times (RTT + SYN) \times (1 - a) \quad (3)$$

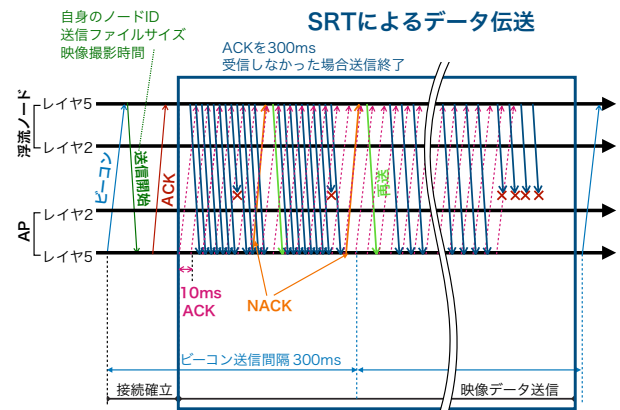


図6 SVTP2022のデータ転送

ここで、 W は、ウィンドウサイズであり、 $AS[\text{packet/s}]$ はパケット到着速度である。また、 $0 < a < 1$ である。

筆者らは、このSRTの使用により小口径下水管内における浮流ノードからAPへの転送可能データ量向上が期待できると予想した。そこで、小口径下水管内において浮流状態の送信機から固定したAPへのすれ違い時のデータ転送量の調査を行った[8]。その調査では、5GHz帯IEEE 802.11nを用い、比較のためにTCP、UDP、SRTのプロトコルを使用した。その結果、それぞれのプロトコルの平均的なデータ転送量は喪失したパケットの再送を伴わないUDPが約72MB、SRTが約68MB、TCPは約56MBとなった。この結果からSRTはTCPの約1.2倍のデータ転送性能があることがわかり、SRTの使用による小口径下水管内における転送可能データ量向上が期待できることがわかった。

3.3 SVTP2022への改良

SVTP2019をもとに、データ転送の機能に改良を加えたSVTP2022を設計・実装した。SVTP2022のデータ転送の流れについて図6に示す。SVTP2022におけるAPと浮流ノードの通信開始における動作は、SVTP2019と基本的に同じである。SVTP2022では、APと浮流ノードのデータ送信を開始するための接続が確立された後、SRTによってデータ転送を開始する。データの不達が発生した場合、SRTに基づく再送処理がなされる。浮流ノードはAPからのACKを300ms受信しなかった場合、データ送信を終了する。今回のSVTP2022の実装では、SRTのデータ送信のための接続確立を1チャンク送信ごとに行っている。SVTP2022ではチャンク送信開始ごとに接続を確立し、1チャンクのデータ分読み出して送信する。そして、チャンク送信終了ごとに接続を終了する仕組みになっている。本稿の調査では、1チャンクのサイズは約2MBであり、2秒分のデータに相当する。これを読み出して、SRTの最大ペイロードサイズである1316bytesごとにSRTパケッ



図 7 実験場の様子

トとして送信する。SVTP2019 では、データ送信する際に RSSI を測定を行い、閾値以下ならデータ送信を行わない仕様であったが、今回の SVTP2022 の実装では、その機能を含めていない。SRT を用いた場合の RSSI の閾値のチューニングは、今回の測定結果に基づいて今後調整する予定としている。

4. 小口径下水管内転送可能データ量の測定実験

4.1 実験環境及び機器

直径 200 mm の埋設塩ビ管内において、5 GHz 帯 IEEE 802.11n 通信を用いて SVTP2022 の浮流ノードから AP への転送可能データ量測定実験を行った。本実験は、学内に設置された全長 22 m の直径 200 mm 埋設塩ビ管内において実施した。管の上には 200 mm の土被りがある。塩ビ管には、作業用に 1 m ごとに縦穴が開けられているが、実験中は縦穴に土嚢により蓋をすることにより管外に電波が漏れ出ないようにした。塩ビ管内には水流を発生させ、流速 0.24 m/s で水位は 50 mm である。浮流ノードを浮流させ、固定された AP と通信させた場合の転送可能データ量を測定した。AP が送受信したパケットをパケットキャプチャソフトにより記録した。この実験を 5 回行った。また、同様の設定で SVTP2019 についても測定を 1 回行った。

小型 Linux コンピュータ (Raspberry Pi Model 3B+) をデータ送信用端末 (以下、浮流ノードと呼称) として利用した。Raspberry Pi 内蔵の IEEE 802.11 無線 LAN チップを使用し、5 GHz 帯 IEEE 802.11n でデータを送信した。MCS (Modulation and Coding Scheme) の設定は auto とした。受信用端末 (以下、AP と呼称) には、Scenargie



図 8 実験に使用した送信端末 (浮流ノード)



図 9 受信側端末 (AP) とアンテナ配置

Comm Node 3 カスタマイズ版 (Linux Box, 無線 LAN アダプタ Qualcomm Atheros 9300) を用いた。これらを図 9 に示すように設置した。

4.2 実験結果と考察

図 10 に SVTP2022 及び SVTP2019 の一度の通信機会での浮流ノードから AP へ送信に成功したデータ量を示す。SVTP2022 を用いた際の浮流ノードと AP の接続時間の平均は、34.02 秒であった。SVTP2022 の一度の AP との通信機会において受信に成功したデータ量の平均は約 56.04 MB であり、SVTP2019 では約 22.04 MB であった。

実験結果から SVTP2022 でどれほどの映像データが浮流ノードから AP へ転送できるのか考察する。本システムで使用を想定している映像品質は、720p, 30fps 可変ビットレートである。iPhone 等のカメラによって 720p, 30fps, 可変ビットレートの映像品質で撮影された基本的なデータ量は 1 分の動画で 45 MB である。今回転送に成功したデータ量を時間に換算すると、約 74.6 秒になる。下水管内における一般的な流速は 0.3 m/s であることから、今回のデータ量は約 22.38 m 分の下水管内映像を転送できると考えられる。

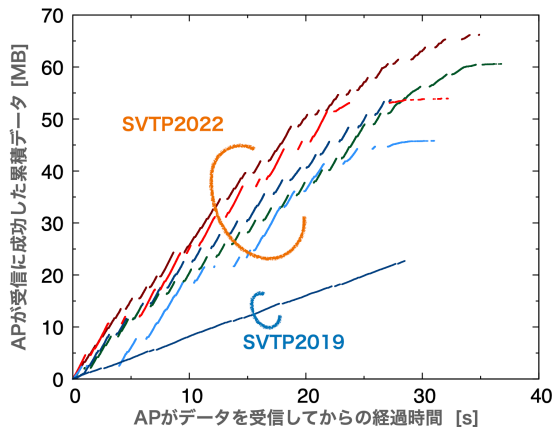


図 10 SVTP2019 と SVTP2022 の浮流ノードから最初にデータを受信後からの経過時間に対する受信した累積データ量 (通信条件: 5 GHz 帯 IEEE 802.11n 通信, MCS auto | 直径 200 mm 塩ビ管内)

しかしながら、この単位時間当たりのデータサイズは、一般的な屋外や明るい部屋で撮影された動画の目的なデータサイズである。可変ビットレートの動画の場合、下水管内のように暗く、撮影している対象の状態が変化しづらいような環境では、単位時間当たりのデータ量は小さくなる。実際に直径 250 mm の模擬ヒューム管内に浮流ノードを浮流させ照明を用いて、720p, 30fps, 可変ビットレートの規格で撮影を行ったところ、50 秒程度の動画のデータサイズが 10 MB であった。これを基にして、今回の実験で転送できた映像データ量を考察する。SVTP2022 により転送できたデータ量 56.06 MB は、約 264 秒分の映像データとなり、下水管内の流速 0.3 m/s で計算すると、約 80 m 分の下水管内映像を転送できると考えられる。一般的なマンホールの設置間隔は、自治体にもよるが最大 80 m と設定している自治体が多く [15], SVTP2022 を用いた場合、浮流ノード 1 台のみで一般的なマンホールの設置間隔の最大値である 80 m の映像を伝送することができるといえる。

筆者らが [8] にて行った TCP, UDP, SRT でのデータ転送性能を調査した結果と比較する。今回の SVTP での実験と同じ環境での平均バルクデータ転送量は TCP が 56 MB, UDP が 72 MB, SRT が約 68 MB であった。今回の実験の SVTP2022 の平均転送可能データ量は 56.06 MB は、SRT と比較した場合約 82.5% 程度で、TCP と同程度であった。この結果から、SVTP2022 にはさらなる転送性能向上の余地があるといえる。今回の SVTP2022 の実装では、チャンク送信開始ごとに SRT の接続を確立しており、この処理のオーバーヘッドが大きいと考えられる。そのため、一度の浮流ノードと AP の遭遇機会に対して、1 度の接続のみとすることが望ましい。

また、本稿での実験では、IEEE 802.11 の MCS は auto に設定している、MCS を auto にしている場合、送信レー

トの変更が無線 LAN チップ依存である。そのため、浮流ノードが AP と遭遇した直後の頻繁な再送の発生などにより、送信レートを過剰に下げってしまうような仕組みになっていた場合、SRT の送信レート調整の機能を十分な性能を発揮できないことが考えられる。高い送信レートによりデータを送信する MCS7 などに固定した場合、トータルのデータ転送量は向上する可能性がある。

5. まとめ

本研究では、浮流無線カメラを用いた省力下水管検査システムを実現するため、下水管内の映像伝送プロトコルのデータ転送性能向上を目指し、これまで安田らが開発・実装してきた UDP ベースのアプリケーション層プロトコル SVTP2019 に信頼性のある UDP ベースプロトコルである SRT をデータ転送機能に実装した SVTP2022 を開発した。そして、 $\phi 200$ mm 埋設塩ビ管において 5 GHz 帯 IEEE 802.11n 無線 LAN 通信を使用した場合の SVTP2022 のデータ転送性能を調査した結果、下水環境において、SVTP2022 は浮流ノードと AP の一度の遭遇機会において 56 MB のデータを送信することに成功した。これは、720p, 30fps, 可変ビットレートの映像品質で下水管内映像約 264 秒分の映像データとなり、下水管内の流速 0.3 m/s で計算すると、約 80 m 分の下水管内映像を転送できることがわかった。今後の課題として、一度の浮流ノードと AP の遭遇機会において、SVTP2022 のデータ送信における SRT の接続確立を一度にする仕様に変更することや固定の MCS の設定値や接続時の RSSI の閾値、チャンクサイズのチューニング、より詳細な SVTP2022 の挙動の調査などが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金挑戦的研究（萌芽）（研究課題番号 21K18746）の助成によるものである。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- [1] 広島市下水道局: “広島市下水道管路施設の点検・調査マニュアル 管きょ・マンホール編” (2015).
- [2] 管清工業, 株式会社日水コン, 八王子市: “管口カメラ点検と展開広角カメラ調査及びプロファイリング技術による管渠マネジメントシステム,” <https://www.mlit.go.jp/common/001228052.pdf> (2022/2/14 確認)
- [3] 株式会社キュー・アイ: “長距離走行型デジタル伝送 TV カメラ装置 PV-2300,” <http://www.qi-inc.com/index.php?e=57> (2022/2/14 確認) .
- [4] S. Ishihara, Z. Liu, S. Tachibana, and T. Yasuda, “Implementation of video data transmission protocol for a narrow sewer pipe screening system using drifting wireless cameras,” 2020 International Conference on Information Networking (ICOIN), pp.384-389, (2020.1.9, AC Hotel Barcelona Forum, Barcelona, Spain).
- [5] 安田智則, 石原進: “狭下水管内における複数浮流無線カメラからの映像伝送プロトコルの設計と実装,” 電子情報通信学会技術研究報告, センサネットワークとモバイルイ

- ンテリジェンス研究会, Vol.119, No.406, SeMI2019-118, pp.79-84 (2020).
- [6] S. Tachibana, S. Ishihara: “Wireless LAN communication using multiple antenna access points in narrow sewers,” 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC2020) (2020).
- [7] 立花誠也, 近本祐介, 堤悠喜, 石原進: “小口径下水管内での浮流無線 LAN ノードからのバルクデータ転送性能,” 電子情報通信学会 センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会, 電子情報通信学会技術研究報告, IEICE-SeMI2020-28, vol.120, no.261, pp.51-56(2020).
- [8] 立花誠也, 近本祐介, 堤悠喜, 石原進: “小口径下水管内における高信頼性 UDP ベースプロトコルを使用した際のデータ転送性能,” センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI), 電子情報通信学会技術研究報告, vol.121, no.266, SeMI2021-31, pp.7-12. (2021.11.25, 機械振興会館, 東京).
- [9] 川合健斗, 島田彩加, 武居悠樹, 石原進, “無線 LAN 受信信号強度を用いた鉄筋コンクリート製下水管内における自己位置推定に関する基礎検討,” 情報処理学会 第 81 回全国大会, 6V-03 (2019)
- [10] “SRT Alliance, Secure Reliable Transport,” <https://www.srtalliance.org>.
- [11] He, E.; Leigh, J.; Yu, O.; DeFanti, T.A., “Reliable blast UDP: Predictable high performance bulk data transfer,” In Proceedings of IEEE Cluster Computing, pages 317–324, (2002).
- [12] “RFC9000 QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport,” <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9000>.
- [13] Yunhong Gu and Robert L. Grossman, “UDT: UDP-based Data Transfer for High-Speed Wide Area Networks,” Computer Networks (Elsevier). Volume 51, Issue 7 (2007).
- [14] Mark R. Meiss, “Tsunami: A High-speed Rate-controlled Protocol for File Transfer,” 2002, [Online]. www.evl.uic.edu/eric/atp/TSUNAMI.pdf.
- [15] 小田原市上下水道局, “小田原市公共下水道施設設置基準,” <https://www.city.odawara.kanagawa.jp/global-image/units/324919/1-20171004150811.pdf>. (2022 年 2 月 2 日確認).