SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

Design and Implementation of a Cooperative Video Data Collection Scheme Using Multiple Drifting Wireless Camera Nodes in a Sewer Pipe

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-10-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田中, 悠大, 武居, 悠樹, 石原, 進 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/00028403

複数の浮流無線ノード協調による下水管内撮影データ回収手法の設計と実装*

田中　悠大†　　武居　悠樹††　　石原　進†††

Design and Implementation of a Cooperative Video Data Collection Scheme Using Multiple Drifting Wireless Camera Nodes in a Sewer Pipe*

Yudai TANAKA†, Yuki TAKEI††, and Susumu ISHIHARA†††

あらまし　下水管の老朽化が深刻化し，定期的な検査と整備が急務となっている．現在用いられている下水管検査手法には，検査範囲が限られる，作業の手間が多い，費用が高い等の問題がある．筆者らは，安全，低コストかつ短時間での下水管検査を実現するために，複数の無線通信可能な浮流カメラノードを用いた下水管内映像無線収集システムを提案している．本システムでは，浮流カメラノードが撮影した映像を，マンホール内のアクセスポイント（AP）に無線電波通信によって送信する．しかし，狭い下水管内では電波の見通し確保が難しく，映像のような大容量データの伝送が困難となる．そこで本研究では，浮流ノードが AP との限られた通信機会を用いて映像データを確実に伝送可能とするために，複数ノード間の協調による映像伝送方式を設計した．小型 Linux マシンを用いて提案方式に基づくシステムを実装し，模擬下水管内での実験により，複数のノードが撮影した映像を分割して転送可能なことを確認した．

キーワード　センサネットワーク，下水管検査，モバイルセンサ，間欠的接続

1. まえがき

2015 年に，日本の下水道の総延長は約 46 万 km に達しているが，このうち約 1/5 が設置から 30 年以上経過している [1]．下水管路は，施設後 30 年以上経過すると陥没をはじめとする不具合が発生しやすく，近年では下水管の老朽化を原因とする道路陥没事故が毎年約 4,000 件発生している [2]．このため，下水管の定期的な検査が求められるが，年間の検査延長は全国の下水管総延長のうち 1%程度に過ぎないのが現状である [3]．この原因として，既存の下水管の検査手法はコストが高いこと，検査に時間を要することが挙げられる．

下水道検査は，主に目視，ファイバースコープ，有線接続されたロボット [4] によって行われる．これらの検査方法は，管内の映像をリアルタイムで見ることができるため，検査の確実性に優れるという利点があるものの，金銭的，人的に高いコストを伴う．近年考案されたストリームカメラ・システム [5] は，カメラ搭載の船体を下水管内に流して管内映像を録画し，本体を回収して得られた映像を確認することで下水管の損傷状態を確認するシステムである．このシステムでは従来の手法と比較して低コストかつ短時間で検査を行うことができるが，本体の投入と回収の際は，作業者が下水管内に入る必要がある．

以上のような理由から，時間面，金銭面，労力面で効率的に下水管を検査可能な手法が求められている．石原らは，カメラ，センサ，無線通信機器を搭載した複数の浮流カメラ・センサノード（以下，単に浮流ノードと呼ぶ）を用いて収集した下水管内の映像・センサデータを，マンホール内に設置したアクセスポイント

† 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻，浜松市
Graduate School of Integrated Science and Technology, Department of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu-shi, 432–8561 Japan
†† 静岡大学工学部システム工学科，浜松市
Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering, Shizuoka University, Hamamatsu-shi, 432–8561 Japan
††† 静岡大学学術院工学領域，浜松市
College of Engineering, Academic Institute, Shizuoka University, Hamamatsu-shi, 432–8561 Japan
* 本論文は，システム開発・ソフトウェア開発論文である．
DOI:10.14923/transcomj.2017ASP0007

 ⓒ一般社団法人電子情報通信学会 2017

（AP）で回収する，流れるセンサネットワークを提案している（図 1）[6]．当システムでは，複数の浮流ノードを使用することに加え，検査中に定期的に AP にデータを転送することで，下水管内で浮流ノードが故障した場合でもデータ回収を可能とする．本システムを用いて，高画質映像のような大容量データの転送を行う場合，十分なスループットか十分な通信時間，あるいはその両方が必要となる．しかしながら，下水管内には管外側の水分を含む土砂，汚水，木根，堆積物により電波が減衰し，無線通信距離が短くなる．このため，浮流ノードが AP と通信可能な時間は短く，高速な通信速度を長い間維持することは困難であると考えられる．筆者らは口径 200mm の実験用パイプを用いて出力 10dBm/Hz で，周波数帯域 920MHz2.4GHz，5GHz の無線端末を使用した通信実験を行い，この口径の管内では 920MHz，2.4GHz を用いた場合の通信可能距離が 3m 程度にとどまるのに対し，より周波数の高い 5GHz 帯を用いた場合により長い 8m の通信可能距離が得られること確かめている [7]．

そこで本論文では，狭い下水管内における浮流ノードと AP 間の通信可能時間が短いという制約のもと，AP 間の区画の撮影映像データを AP に全て送信可能とすることを目的として，複数の浮流ノードを用いて同じ区間の映像を撮影し，互いに重複しない区間の映像を競合することなくそれぞれ AP に送信する協調的データ伝送方式を提案する．また，当方式に基づいて複数の浮流ノードを用いたデータ伝送システムの試作システムを実装し，模擬下水管内での動画送信実験によって提案方式の効果を確認する．

以下，**2.** では現在用いられている下水管検査手法と，近年開発された下水管検査手法を紹介し，それら検査手法の利点と欠点について述べる．**3.** では浮流ノードを用いた下水管内映像伝送検査システムの概要を示し，浮流カメラノードを用いた下水管内映像伝送の課題を説明する．**4.** では，下水管内の浮流ノードと AP との短い時間で大容量データを確実に転送可能な転送方式の設計について述べる．**5.** で，試作した浮流ノードを用いた映像伝送システムの実装と，模擬下水管環境で行った評価実験ついて述べ，最後に **6.** で本論文のまとめを述べる．なお，本論文は [8] に発表された提案内容に関して，方式の記述を改めた上，提案方式の実装に基づく測定実験に関する記述を加えたものである．

2. センサネットワークを用いた下水管検査内データ回収

2.1 センサを用いた下水管検査

Stoianov ら [9] は，マンホールに固定したセンサを用いて管内の水位，水圧，音響のセンサデータをもとに管内の水の漏れ検出を行うシステム PIPENET を提案している．PIPENET は，Mote，ゲートウェイ，ミドルウェアとバックエンドによって構成される．Mote は，小容量のストレージとセンサを搭載しており，センシングを行う．Gateway は，大容量のストレージをもち，Mote からデータを収集しサーバに転送する．

Kim らは，下水管内のガス検出を低コストかつ自動的に行うためのシステムとして，SewerSnort を提案している [10]．SewerSnort は，ドリフタと呼ばれる浮流式のセンサと，検査対象範囲内の全てのマンホール下に設置された無線ビーコン発信機で構成される．ドリフタは，センサによってガスの量を計測しつつ，受信したビーコンを用いて計測地点の位置を推定し，これらの情報を自身のストレージに記録する．検査終了後は，検査範囲の下流でドリフタを回収することで，下水管内のガスの分布情報を収集できる．

SPAMMS [11] は，ガス，油，水，下水等のパイプラインの検査を目的とした，RFID とモバイルセンサ，自走ロボットを組み合わせた検査システムである．SPAMMS を用いた検査では，はじめに自走ロボットを用いて RFID を管内に設置する．RFID は，自身の識別番号をビーコンに乗せて発信することでモバイルセンサの位置検出が行えるようにしている．

2.2 モバイルセンサネットワークにおけるデータ回収

モバイルセンサネットワーク（MSN）は，移動体をノードに含むセンサネットワークである．MSN で移動するシンクを，モバイルシンク（Data MULE [12]，Message ferry [13] とも）と呼ぶ．モバイルノードと呼ばれる自律移動可能なノードが，移動しながらソースノードからセンサデータを集め，離れた地点で静止しているシンクノードにデータを届けるものをモバイルリレー型のセンサネットワークと呼ぶ [14]．本研究で対象とする流れるセンサネットワークにおける浮流ノードと AP 間のデータ伝送は，モバイルシンクやモバイルリレーによる静止ノードとのデータ伝送とよく似た条件をもっている．

MSN の研究分野では，移動するノードと静止して

いるノード間の限られた通信時間内で，保持しているデータを確実に伝送することを目的とした研究は，筆者らの知る限り多くない．文献 [15] では，UAV（Unmanned Aerial Vehicle）に搭載されたモバイルシンクが，地上のノードのからクラスタからデータを受信する際に，クラスタ内のノードを使って，信頼性高いの伝送経路を選択し，スループットを向上させる方式である ICELUS が提案されている．本研究では，通信時間が制限された環境下で，大きなデータを回収するために，複数のノードでデータを分割して送信する方法について検討した．

3. 複数の浮流ノードを用いた下水管内映像伝送システム

3.1 概　　要

浮流ノードを用いた下水管内映像収集システムは，複数の浮流式無線カメラノード（浮流ノード），マンホール下のアクセスポイント（AP），動画集約サーバで構成される．当システムの概略を図 1 に示す．複数の浮流ノードは，互いにぶつからないように適切な間隔を空けて管内に投下される．管内に投下された浮流ノードは，映像を撮影し，下水管きょの検査範囲のマンホール下に適切な間隔を開けて設置された AP と通信可能となった際に無線通信を用いて映像データを AP に送信する．AP は，受信した映像データを有線または無線通信を介して動画集約サーバに送信する．

本システムでは，浮流ノードが取得した映像を無線通信を用いて回収するため，回収した映像を検査中に準リアルタイムで確認できる．また，浮流ノードが故障した場合でも，故障する前の映像を回収することができる．浮流ノードの製作には，カメラ，無線通信機器，それらを制御するコンピュータと電源と外装が必要となるが，既製品の材料を組み合わせて設計すれば，低価格で製作できると考えられる．調査に必要な作業は，マンホール下への AP の設置，浮流カメラノードの投入と回収のみであるため，手間のかかる作業が必要ない．ストリームカメラ方式 [5] では，船型のきょう体を流すためガイドとなる発泡ボールが付いた紐を流した上で，マンホールに人が入ってきょう体を管に配置する．段差がある場所等では，きょう体をマンホール内の作業で取り出し，発泡ボールとガイドラインを取り出す作業を繰り返すことが必要である．マンホール内に人が立ち入って作業をする場合，ガス濃度調査，換気装置の作動を伴うため，そのための時間が生じる．また，マンホール内に人が入る場合，マンホール外で，ガードマンが立ち会う必要が生じ，その分の人的コストを要する．これらの理由から，本システムを用いることで，既存方式に較べて低コストかつ省労力での下水管検査が実現できると考えられる．

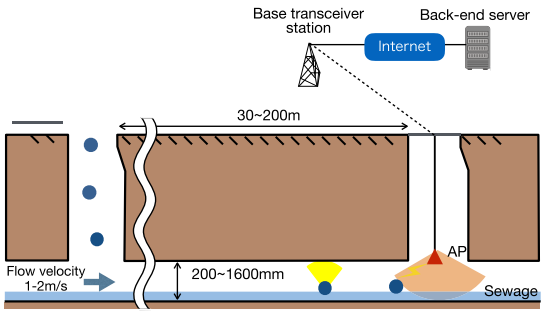


図 1　複数の浮流無線カメラノードを用いた下水管内映像伝送システム
Fig. 1　Sewer inspection system using multiple wireless drifting cameras.

3.2 想 定 環 境

一般的に使用される下水管は，流速 1.0m–1.8m で汚水が流れるように設計されている [16]．このため，浮流ノードもこの速さで流れるものとする．下水管には，管理のために一定の間隔でマンホールが設置されている．マンホール管の距離は，通常 200m 以上離れているため，AP は 200m 以上の距離を空けて設置するものとする．AP の設置に関しては，マンホールの縦穴と下水道パイプの接続部上部に浮流ノードと物理的に干渉することがない場所に，マンホール上部から吊り下げるなどの手法で AP のアンテナを配置することを想定する．

下水管の管径は使用される場所によって異なるが，本システムでは管径 200mm 以上の下水管を検査の対象とする．管径 200mm の下水管は，分流型の下水管システムにおける幹線として一般に広く使用されている [16]．浮流ノードが管内を流れていくためには，管内に一定量の汚水が流れていなければならないため，下水管内には常に一定量の汚水が流れているものとする．検査が必要な下水管では，管内への木根の侵入や汚物，土砂が堆積していることが考えられる．したがって，これら障害物への衝突あるいは接触によって，浮流ノードが故障する場合や，一定の期間管内に詰まること場合があることとする．また，下水管は通常，処理施設までの延長は数 km であるため，当システム

の検査範囲は最大でも数 km とする．

本システムの用途として，[5] と同様に，管体の破損，土砂流入，たるみ，クラック，侵入水の噴出，樹木根の進入等の重大損傷の有無とその位置を把握し，詳細調査の必要性を明らかにするための調査，スクリーニング検査を想定する．[5] のシステムは，実際の自治体での調査に使用されており，使用されている映像は，1/3 インチ CCD カメラ（走査線 550 本）で撮影した標準画質映像である．また簡易的な自走型カメラを用いた解像度 720p の HD 画像を用いた調査事例があり，十分にこの解像度で詳細調査を必要とする重大損傷の判定が行えることが示されている [17]．本論文では，720i～1080p の映像を伝送することを想定する．なお，重大損傷の有無の検出のためには，撮影が撮像素子の性能に応じた十分な照明のもと行われる必要があるが，本論文では撮影済のデータ転送方法に着目し，照明方法に関しては本論文の扱う範囲に含まないものとする．

3.3 浮流ノードを用いた映像伝送システムにおける課題

浮流ノードが回収回収地点に達することを待つことなく撮影データを回収するために，浮流ノードは AP との限られた通信時間を利用して確実にデータ送信を完了する必要がある．本システムを用いた大容量の観測データ回収のための課題をまとめると以下のようになる．

（1） AP が少ない場合でも，各浮流ノードが AP と通信可能な時間内に映像データを滞りなく転送可能とする．

（2） 浮流ノードと AP との短い通信時間の間に，AP 間で撮影した映像データ全てを送信完了する．

（3） 1，2 が，浮流ノード間の距離が変化した場合にも達成できる．

浮流ノードが蓄積したデータ全てを AP に確実に送信完了するための方策は，大きく分けて二つ考えられる．

一つ目の方策は，各浮流ノードと各 AP との通信帯域を広げることで，通信期間に送信可能なデータ量を増やすことであるが，物理層の高速化については本論文の範囲外とする．

二つ目の方策は，浮流ノードが AP に送信するべきデータ量を減らすことである．単純な方法として，浮流ノードが撮影する映像の品質を下げるか，圧縮率の高い符号化方式を利用することにより，映像データのサイズを小さくできる．しかし，映像の品質を下げることは，本システムの利用目的にそぐわない．

なお，多数の AP を設置して AP 間の間隔を狭くすれば，浮流ノードが各 AP 送信するデータ量を削減できる．しかしながら，AP の間隔はマンホールの位置によって制限されるため，AP を高密度に設置することは難しい．そこで，本論文では，浮流ノードが AP に送信する映像の撮影区間を，複数の浮流ノードを用いて分担することで，各浮流ノードが送信するデータ量を減らすことに着目し，AP 間の区画の撮影映像データを AP に全て送信するための方法を提案する．

4. 複数ノードによる協調的データ転送方式

浮流ノードと AP 間の通信可能時間が短いという制約のもと，AP 間で撮影された映像データを AP に全て送信することを目的とした，複数の浮流ノードによる協調的データ伝送方式を提案する．本手法では，AP から定期的に送信されるブロードキャストパケットを利用して，各浮流ノードがそれぞれ別の範囲で収集された観測データを送信するように制御し，更に，近接する浮流ノードがデータ通信中の送信を待機することで大容量データの回収を実現する．

4.1 データ未回収範囲の検出

本手法では，AP が定期的にブロードキャストするビーコンパケットを用いて，浮流ノードによって収集された観測データがサーバに保存されていない下水管内の範囲を浮流ノードに通知する．浮流ノードは，収集したデータをチャンクに分割して AP に送信する．チャンクの長さは，ビデオの再生時間が定数となるように定める．各チャンクが回収された位置を識別するために，下水管の検査範囲を，セグメントとセグメントの一部であるサブセグメントに分割し，各チャンクをサブセグメントに対応させて管理する．n 個の AP が設置された検査範囲を各 AP 上流の n 個のセグメントに分け，$S = \{s_1, s_2, \ldots, s_n\}$ を n 個のセグメントの集合とする．浮流ノードの投下地点には，AP と同様のビーコンを送信する装置を設置し，各浮流ノードがこの装置からのビーコンを受信した地点から，AP のビーコンを初めて受信した位置までの範囲を s_1 とする．これ以外のセグメントは，直前のセグメントが終了した位置の直後から，それ以降 AP の信号を初めて受信した位置までの範囲であるとする．

各チャンクが収集された範囲を，セグメント s_i 内のサブセグメント $r_{ij}(j = 1, 2, \ldots)$ とする．各 AP は，映像回収済みのサブセグメントの開始地点と終了地

点を推定し，定期的にブロードキャストするビーコンパケットを用いて，観測データを未受信の範囲を浮流ノードに通知する．下水管内では，GPS の電波を受信することは難しいと考えられるため，GPS を利用して浮流ノードが自身の位置を特定することはできない．[10] では，マンホールに設置されたビーコン送信機の電波の受信信号強度を用いて位置推定を行う方法を示しているが，この位置推定が可能なのは，ビーコン送信元の前後数十 m の範囲内に限られる．各ノードは同じ位置から投下され，互いに数十 m 離れて浮流することを想定しているため，各浮流ノードは大まかに同じ速度で移動すると考えられる．そこで，タイムスタンプを用いてセグメントとサブセグメントを表現する．

m 個の浮流ノードを使用するとき，浮流ノード DN_k $(k = 1, 2, 3 \ldots m)$ が APi からのビーコンパケットを受信した時刻が時刻 $t_o^{(i,k)}$ であれば，セグメント s_i は，$t_o^{(i-1,k)}$ から $t_o^{(i,k)}$ の間に浮流ノード DN_k が移動した範囲となる．浮流ノード DN_k は，r_{ij} に対応するチャンクの撮影開始時刻 $t_s^{(i,j,k)}$ と終了時刻 $t_e^{(i,j,k)}$ を用いて，r_{ij} が，APi のビーコンを受信した位置を基準として $t_s^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)}$ 秒移動した位置と $t_e^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)}$ 秒移動した位置の間の範囲であると推定する．サーバ，浮流ノード，AP が $t_s^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)}$ と $t_e^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)}$ を用いて r_{ij} の開始位置と終了位置を推定し，浮流ノードがサーバが未回収のチャンクを送信するように動作することで，複数ノードから分割して映像を回収し，検査範囲全体の映像を転送する．浮流ノード $DN1$ が定めるセグメントとサブセグメントのタイムスタンプの例を図 2 に示す．この例では，時刻 20 で投下地点のビーコンを受け取った浮流ノードが，撮影した映像データを再生時間 2 のチャンクに分割して AP からのビーコンを受信することで n 番目の AP までのセグメント及びサブセグメントを識別した場合を示している．

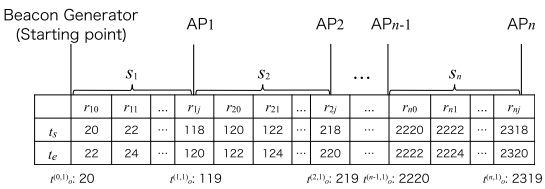


図 2　浮流ノード $DN1$ が割り当てるセグメントとサブセグメントのタイムスタンプの例

Fig. 2　An example of allocation of segments at a node.

AP は，映像回収済みのセグメントの開始時刻 $u_s^{(i)}$ と終了時刻 $u_e^{(i)}$ をビーコンパケットによって浮流ノードに通知する．サーバで映像回収済みのサブセグメントのタイムスタンプを用いて $u_s^{(i)} \leftarrow \max_{(i,j,k)\in R}(t_s^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)})$，$u_e^{(i)} \leftarrow \min_{(i,j,k)\in R}(t_e^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)})$ として更新する．ただし，R はサーバで回収済みのチャンクに対応するアクセスポイント，サブセグメント，ノードの番号の組の集合であるとする．

タイムスタンプを用いてセグメント及びサブセグメントを定めると，各ノードのビーコン受信位置，浮流速度，タイムスタンプのずれによって各ノードが定める r_{ij} にずれが生じる．このずれによって，回収できない範囲が出ることを防ぐために，浮流ノードが AP を通過する際に AP との時刻同期を行うことで，各浮流ノードでの時刻同期を図る．また，浮流ノードは，$u_s^{(i)} > (t_s^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)})$ または $u_e^{(i)} < (t_e^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)})$ となるサブセグメント r_{ij} に対応するチャンクを選択して送信することで，各ノードが送信するチャンクのサブセグメントが重複するように送信する映像チャンクを選択する．

AP は，観測データをメタデータ（$t_s^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)}$，$t_e^{(i,j,k)} - t_o^{(i,k)}$，AP の ID，観測データを送信したノードの ID）とともに集約サーバに送信する．また，AP は集約サーバに定期的に未回収範囲を問い合わせ，集約サーバは受信した観測データのデータベースから未回収範囲を特定し，AP に通知する．AP は，自身よりノード投下地点に近い前の AP が配置されたセグメントに割り当てられた未回収範囲があれば，この情報もビーコンパケットに付与する．浮流ノードは，AP から初めて電波を受信したとき，ビーコンパケットを受信し，この中に含まれる未回収範囲に対応する時間差を利用して未蓄積範囲に対応する観測データを送信する．未蓄積範囲の情報は AP へのデータ送信だけでなく，浮流ノードのストレージの容量が不足した場合に，削除する観測データを選択する際にも利用される．

4.2　同時送信の抑制

複数の浮流ノードが同時に一つの AP と通信可能となったとき，複数の浮流ノードが隠れ端末の関係となる場合がある．隠れ端末問題への対策として，IEEE802.11DCF では，RTS/CTS 方式を用いた仮想キャリアセンス方式が用意されている．RTS/CTS 方式は，隠れ端末がある場合でも信号衝突を回避することができるが，データフレーム送信前の RTS/CTS

の交換によってオーバーヘッドが増加するという問題があり，利用する例が少ない．浮流ノードと AP 間のデータ伝送においては，RTS/CTS の利用によるオーバーヘッドの増加は，浮流ノードと AP の短い通信時間を浪費してしまうおそれがある．

そこで，AP が送信するビーコンパケットを，複数の浮流ノードによる同時送信の制御にも利用する．AP は，浮流ノードから観測データを受信する間，データ送信元の浮流ノードの ID 番号をビーコンパケットに付与する．浮流ノードは，自身以外の浮流ノードの ID 番号が付与されたビーコンパケットを受信すると，AP へのデータ送信を待機する．このようにして，複数の浮流ノードによる AP への観測データの同時送信が発生しないよう制御する．

図 3 及び図 4 に，未回収範囲の検出してデータ送信しつつ，同時送信を抑制する例を示す．$DN1$ とその後続の $DN2$ が，図 3 に示すような位置関係で浮流しており，それぞれ s_2 で記録された観測データをストレージ内に保持している．図 4 において，両端に矢印が付いた線は信号を表し，線の長さは信号の到達範囲を表す．横軸は水平方向の位置を表し，縦軸は経過時

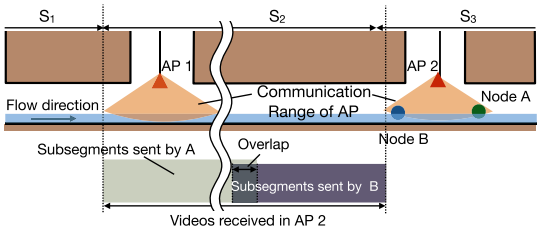


図 3　分割転送の概略
Fig. 3　Overview of division transfer among drifting nodes.

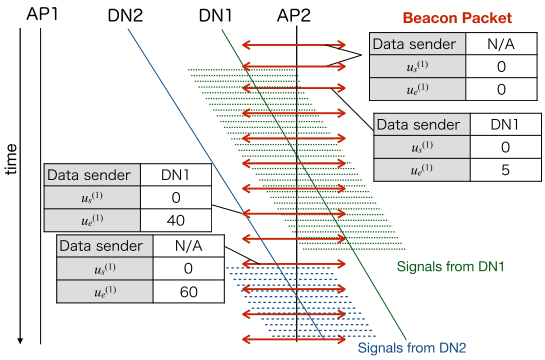


図 4　複数ノードによる協調的映像伝送の例
Fig. 4　An example of cooperative data transmission.

間を表す．このとき，浮流ノードと AP は次のように動作する．まず，$DN1$ は，AP2 との通信範囲内に入るとビーコンパケットを受信し，$u_s^{(2)}$ 及び $u_e^{(2)}$ を用いて送信する映像チャンクを選択する．AP2 は $DN1$ から観測データを受信するとともに，ビーコンパケットに $DN1$ の ID 番号を付与する．続いて，$DN2$ が AP2 との通信範囲に入り，AP からのビーコンパケットを受信する．このとき $DN1$ は，ビーコンパケットに付与された ID 番号から $DN1$ が AP と通信中であることを検知し，映像データの送信を待機する．$DN1$ は，サブセグメント r_{20} から r_{2t} で撮影されたデータの送信に成功する．$DN1$ と AP の通信が終了すると，AP は受信した観測データと，そのメタデータを集約サーバに送信する．これ以降，AP2 は，$DN1$ が通知した r_{20} 及び r_{2t} のタイムスタンプを用いて $u_s^{(2)}$ 及び $u_e^{(2)}$ を更新してビーコンパケットを送信する．$DN1$ が AP2 との通信範囲外に出た後も AP2 は受信待機状態を待機するが，一定時間パケットが受信不能となり，$DN1$ とのリンクが切断されたことを検知する．AP2 は直ちに付与していた $DN1$ の ID 番号を消去したビーコンパケットを送信する．$DN2$ は，$u_s^{(2)}$ 及び $u_e^{(2)}$ を用いて適切な映像チャンクを選択することで，$DN1$ が観測データを送信できなかった範囲で収集された観測データを送信する．

なお，上述の手法では，先行浮流ノードの通信を優先させるアプローチをとっているが，後続する浮流ノードの通信を優先させる方法も考えられる．この場合，後続する浮流ノードが AP からのビーコン検出後，AP にメッセージを送り，それを AP が検出後，この後続浮流ノードの通信開始を促し，先行する AP の通信を停止することとなる．この場合，後続浮流ノードからのメッセージ送信が先行ノードとの通信と衝突する可能性があるほか，後続ノードからメッセージが届いたときの信号強度が一時的に強い場合には，その信号直後に必ずしも後続ノードからの通信の方が良好な状態が続くとは限らないことも考えられる．以上の観点から，本論文では，先行浮流ノードを優先させる設計とした．

5.　試作システムの実装と実験

提案する複数の浮流ノードによる下水管検査システムでは，浮流ノードは映像転送のためにカメラと高速無線インタフェースを備えることに加え，下水管内を浮流可能なきょう体，暗所でも鮮明な映像を撮影可

能とする照明が必要となる．本実装では，複数の浮流ノードによる映像の分割転送に焦点を当て，最低限の機能のみを備えている．以下，試作システムの構成を示し，浮流ノード，AP，サーバのハードウェアとソフトウェアの実装を述べ，この試作システムを用いた映像回収実験の結果を示す．

5.1 浮流ノードの実装

5.1.1 ハードウェア

浮流ノードは，防水のきょう体に入れて管径 200mm 以上の下水管を浮流するため，小型で軽量な部品で構成することとした．また，金銭的コストを低く抑えるため，浮流ノードは，2017 年現在一般に販売されている機器を用いて作成した．Linux が動作可能な小型シングルボードコンピュータ Raspberry Pi3 と CSI-2 Raspberry Pi 専用カメラモジュールと USB 接続された小型 USB 無線 LAN ドングル PLANEX GW-450D とバッテリ ANKER Astro Slim 4500mAh Portable Charger で浮流ノードを構成した．Raspberry Pi3 は Broadcom BCM2837 チップセットを搭載し，H.264 のハードウェアエンコーディングに対応しているため，撮影したビデオを比較的短時間で高い圧縮率で符号化できる．大きさは 85mm × 56mm × 21mm であり，重さは 45g である．専用カメラモジュールは，500 万画素のイメージセンサを搭載し，1080p，30fps の動画の記録が可能である．大きさは 20mm × 25mm × 10mm である．Planex GW-450D は 5GHz 帯での IEEE 802.11a/n による通信が可能である．

これらの総重量は，163.5g であり，材料費は 8,500 円程度である．なお，実際に下水管で運用するためには，上記の機能に加えて，これに撮影用の照明と，及び撮影時の姿勢安定化のための機構，防水型のきょう体が加わる．流速 1m/s で最大 2km を移動した場合の必要稼働時間 33 分を考え，必要なバッテリ容量を絞り込むことで，最終的には重量をスマートフォンと同程度の 150-200g 程度に抑えられると見込まれる．この程度になれば，水量が特に少ない場合を除いて，きょう体を口径 200mm の管中に十分収まるサイズで浮流させることが可能と考えられる．

5.1.2 ソフトウェア

浮流ノードでは Raspberry Pi 専用 Linux ディストリビューション Raspbian 上で，C 言語で実装した動画送信用ソフトウェアが動作する．浮流ノードは動画送信用ソフトウェアを使って，動画を撮影しながら AP からのブロードキャストパケットを待機する．カメラモジュールで撮影した映像を，約 2 秒ごとに H.264 規格を用いて 1080p，30fps の映像データに符号化し，撮影開始及び終了時間，ファイル名を含むメタデータとともにストレージに保存する．AP からのブロードキャストパケットが到着すると，要求に合致するメタデータをもつ動画を AP に送信する．

浮流ノードのデータ送信では，トランスポート層プロトコルに UDP を使用し，信頼性を確保するためにアプリケーションでパケットの再送制御を行う．動画のバルクデータ送信のように，データの欠損が許容できない場合，輻輳制御と再送制御により信頼性が保証されている TCP をトランスポート層のプロトコルとして使用するのが一般的である．しかしながら，浮流ノードが想定する通信時間は短く，AP とは 1 ホップの通信しか行わない．また，無線 LAN 環境では，実際の通信品質に合わせて輻輳ウィンドウを制御することが難しく，輻輳制御を行わない方が高いスループットが達成できると考えられる．このため，逐次再送方式をアプリケーション層に実装し，再送制御に関するパラメータを調整した．

再送タイムアウトの初期値は 10ms，上限を 200ms，下限を 10ms とした．これらの値を短く設定する理由は，浮流ノードと AP が通信可能な時間は短く，浮流ノードと AP は 1 ホップ通信であり，再送タイムアウトを長く設定することに利点がないためである．再送回数の上限は 4 回とした．

浮流ノードと AP は，MAC 層で IEEE802.11DCF を用いて通信する．提案方法では，競合を起こさない制御がデータ回収方式に導入されているとはいえ，それはアプリケーション層での制御であり，完全に 2 層以下での競合を排除しているわけではない．したがって，2 層以下での衝突は起こり得るものとして，DCF に関する制御パラメータに関しては，機器のデフォルト値を使った．バックオフに関するパラメータは，$CW_{\min}$ は 15，$CW_{\max}$ は 1023 とし，最大再送回数は 4 回とした．

5.2 AP と集約サーバ

AP は，1 秒ごとにビーコンパケットとしてサイズ 20bytes の UDP パケットをブロードキャストし，浮流ノードからの動画送信を待機する．ビーコンパケットは，通信中のノードとの通信がタイムアウトした際にも送信される．なお，この AP はあくまで浮流ノードでの撮影データ転送のための中継点というアプリケーションからの観点でのアクセスポイントであり，

IEEE802.11 ネットワークにおけるインフラストラクチャモードのアクセスポイントとは異なる．本システムの AP は IEEE802.11 のアドホックモードで動作しており，浮流ノードと同一の SSID を使用する．AP と集約サーバは，安定したネットワーク上に接続されていることを想定しているため，互いにトランスポート層プロトコルに TCP を用いて通信を行うこととした．

5.3 試作システムを用いたデータ転送実験

下水管内で通信環境下で試作システムが正しく動作することを検証するため，畑に埋めた長さ 12m の塩ビ管内でのデータ回収実験を行った．図 5 のように，ノードをロープを引きながら AP に向かって秒速約 1m となるように移動させ，浮流ノードからのデータ回収を行った．浮流ノードは，防水用のためにビニール製の袋の中に密封し，プラスチック製のかごの中に入れ，二つのノードの間のロープの長さが 4m となるようにて塩ビ管内に配置した．本実験環境は，分流式下水管システムにおける汚水管の幹線を想定したものである．使用したパイプは，口径 200mm の塩ビ製である．通常は底に口径の 1/4 程度の深さの水が流れていることを想定しているが，今回の実験では水は使用していない．

本実験で使用した直径 200mm の塩化ビニル製の管は幹線として用いられる典型的なものである．国土交通省による平成 21 年度下水道工事資材・工法・機器の発注動向の調査資料 [18] によれば，素材別では，塩化ビニル管が全発注延長の 85.8%を占め，口径別では，200m 以下の口径のものが 87.2%，250-300mm のものが 5.8%であり，その他の口径のものと較べて圧倒的に多くを占めている．

下水管の深さは管底で 400mm であり，これは地下数メートル以上に設置される一般的な下水管に較べると浅いが，事前実験によりパイプ内と地上に配置した出力 10dBm/Hz の IEEE802.11g/ac の端末間の通信は不可能であり，同周波数帯電波による無線通信実験に関しては，この深さの違いによって生じる問題はないといえる．AP は，マンホール下部の下水管との接合部付近に配置するものとしているので，実験では，マンホールを想定した縦穴のパイプとの結合部にパイプ接続部分を覆うようにゴム製のネットを張った上に AP 相当の Raspberry Pi を配置した．

1. で述べたように，筆者らは実験により浮流ノードの使用する無線通信周波数帯には 5GHz が適していることを既に確認しているが [7]，この実験では，AP との無線通信距離を制限するために，IEEE802.11n を 2.4GHz 帯で動作させて通信した．[7] で示されるとおり，2.4GHz 帯で 10dBm/Hz の出力で通信した場合，最大通信可能距離は約 3m である．一方 5GHz 帯での最大通信距離は約 8m である．

図 6 に，浮流ノードから回収したビデオと経過時間の関係を示す．青の帯は，1 台目のノードから，緑の帯は，2 台目のノードから回収できた映像データをそれぞれ示している．1 台目はタイムスタンプ 0 秒から 6.6 秒のデータ 12MB を送り，2 台目は 5.4 秒から 8.7 秒までのデータ 13MB を送った．2 台のノードは，同時に AP と通信可能な期間があったが，同時送信は行っておらず，各浮流ノードが約 1 秒重複した別々の範囲の映像を送信した．この実験の結果，提案方式を用いて各浮流ノードが別々の区間で撮影した動画を送信しつつ，浮流ノード同士の同時送信を抑制可能なことを確認できた．この結果は，近接した先行浮流ノードと後続浮流ノードからの同時送信を抑制し，異なる区間の映像を競合することなく送ることができていることを示しており，本論文で目的とする AP 間で撮影された映像データを短い AP と浮流ノードの接続時間という制約のもとで AP に全て送ることにたいして実

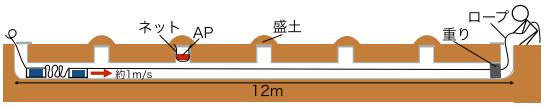


図 5　実験の概略
Fig. 5　Experiments environment.

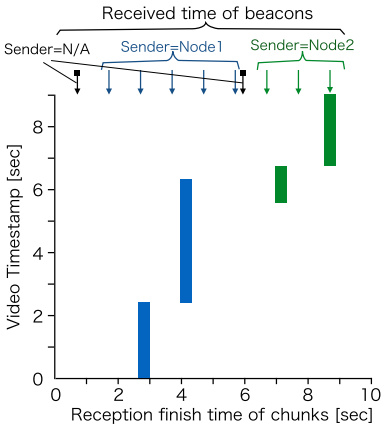


図 6　浮流ノードから回収したビデオと経過時間の関係
Fig. 6　Relationship between video's time stamps and reception finish time of chunks.

現の道筋をつけたといえる．

AP と浮流ノード 1 との接続が切れたあと，AP がビーコンパケットを送信されているが，次のデータ受信まで 2 秒の間が空いている．これは，AP が浮流ノードからのデータ受信を 1 秒間待ち続けるように設定していたためである．浮流ノードの短い通信時間の中で，1 秒の待ち時間は大きな割合をしめているため，浮流ノードから転送可能なデータ量を増やすために，より短い時間で浮流ノードとの通信切断を検知できるようにする必要がある．待ち時間を短しくすぎると，浮流ノードが転送可能であるはずのデータが受信できなくなり受信可能なデータ量が減少してしまうため，浮流ノードが AP に近づいてきた際には受信を待機し続けるべきである．このため，AP から遠ざかることを検知した際に，受信の待機を中断するよう制御し，適切なタイミングでコネクションを切断したい．浮流ノードが遠ざかっていくことを検知する方法としては，AP が浮流ノードからのパケット到着間隔を計測する方法や，AP が浮流ノードが送信する電波の受信信号強度を計測する方法が考えられる．

6. むすび

本論文では，低コストかつ省労力での下水管スクリーニング検査を可能とする浮流ノードを用いた下水管内映像伝送システムにおいて，狭い下水管内における浮流ノードと AP 間の通信可能時間が短いという制約のもと，AP 間の区画の撮影映像データを AP に全て送信可能とすることを目的として，複数の浮流ノードを用いて同じ区間の映像を撮影し，互いに重複しない区間の映像を競合することなくそれぞれ AP に送信する協調的データ伝送方式を提案した．また，提案する映像伝送手法を利用して映像回収を行うテストベッドを Raspberry Pi を用いて実装し，室内と模擬下水管内で映像回収実験を行った．実験の結果，提案方式を用いて 2 台の浮流ノードが別々の区間で撮影した動画を送信しつつ，浮流ノード同士の同時送信を抑制可能であることを確認できた．

今後の課題としては，AP での浮流ノードとの通信状態や位置関係を考慮したデータ受信動作の制御を行うことによるデータ伝送の高効率化によって試作システムの性能を改善することが挙げられる．本論文では先行する浮流ノードの AP との通信を優先する設計を行ったが，後続浮流ノードの接続を優先させて，通信状態が悪化した先行ノードとの通信を早めに終了させる方法が考えられる．この方式は，図 6 に見られた先行ノードのデータ転送終了と後続ノードの通信開始の間の空白時間を埋めるのに有効と考えられる．今後，この後続ノードを優先させる方法についても検討を行う予定である．その後，試作システムをより下水管に近い環境で動作確認し，詳細な評価を行う必要がある．また，チャネルボンディングや MIMO を用いた場合の浮流ノードによる伝送速度を向上効果を検証することで，高画質動画を確実に転送する方法についても調査する必要がある．

謝辞　本研究は，栢森情報科学振興財団研究助成並びに科学研究費補助金挑戦的萌芽研究（研究課題番号 26540034），豊田理化学研究所豊田理研スカラーの助成によるものである．ここに記して謝意を示す．

文　献

[1] 山田弘明，“下水道法改正を踏まえた下水道管路等の施設管理について，” JASCOMA, vol.23, no.45, pp.6–11, 2016.
[2] 横田敏宏，深谷　渉，宮本豊尚，“下水管路施設に起因する道路陥没の現状（国総研資料第 668 号），” 2012.
[3] 榊原　隆，松宮洋介，深谷　渉，福田康雄，西尾称英，“下水道管渠におけるストックマネジメント導入に関する検討調査，” 平成 20 年度下水道関係調査報告書集，国総研資料，vol.543, pp.1–6, 2008.
[4] 日本下水道管路管理業協会，“最新鋭・管内調査用 tv カメラの実力，” Jascoma, vol.17, no.33, pp.11–25, 2010.
[5] 関野　勇，“ストリーム・カメラシステムによる幹線管きょの tv カメラ調査について，” 月間下水道，vol.34, no.3, pp.55–58, 2011.
[6] S. Ishihara and D. Sato, “Active node selection in flowing wireless sensor networks,” Proc. 6th ICMU, pp.8–15, 2012.
[7] T. Nagashima, Y. Tanaka, and S. Ishihara, “Measurement of wlan in sewer pipes for sewer inspection systems using drifting wireless sensor nodes,” IEICE Trans. Commun., vol.E99-B, no.9, pp.1989–1997, Sept. 2016.
[8] Y. Tanaka and S. Ishihara, “Cooperative video data transmission for sewer inspection using multiple drifting cameras,” Adjunct Proceedings of the 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing Networking and Services, pp.195–200, 2016.
[9] I. Stoianov, L. Nachman, S. Madden, T. Tokmouline, and M. Csail, “PIPENET: A wireless sensor network for pipeline monitoring,” 2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp.264–273, 2007.
[10] J. Kim, J.S. Lim, J. Friedman, U. Lee, L. Vieira, D. Rosso, M. Gerla, and M.B. Srivastava, “Sewersnort: A drifting sensor for in-situ sewer gas monitoring,”

Proc. SECON'09IEEE, pp.1–9, 2009.
[11] J.-H. Kim, G. Sharma, N. Boudriga, and S.S. Iyengar, "Spamms: A sensor-based pipeline autonomous monitoring and maintenance system," Communication Systems and Networks (COMSNETS), IEEE, pp.1–10, 2010.
[12] R.C. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data mules: Modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks," Ad Hoc Networks, vol.1, no.2, pp.215–233, 2003.
[13] M.M. Bin Tariq, M. Ammar, and E. Zegura, "Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes," Proc. MobiHoc 2006ACM, pp.37–48, 2006.
[14] Y. Gu, F. Ren, Y. Ji, and J. Li, "The evolution of sink mobility management in wireless sensor networks: A survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.18, no.1, pp.507–524, 2015.
[15] R. Figura, O. Schmitz, T. Hagemeier, M. Ceriotti, F. Brockmann, M. Mulero-Pázmány, and P.J. Marrón, "Icelus: investigating strategy switching for throughput maximization to a mobile sink," 12th Annual Conference on IEEE Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), pp.1–8, 2016.
[16] 日本下水道協会，下水道維持管理指針（実務編）2014 年版，日本下水道協会，2014.
[17] 国土交通省国土技術政策総合研究所，管清工業株式会社，株式会社カンツール，"効率的な下水道管点検カメラ及び簡易な異常判定基準の開発～下水道管きょの効率的な点検調査技術に関する共同研究報告書～，" 国土技術政策総合研究所資料，no.877, 2015.
[18] 国土交通省，"平成 21 年度下水道工事資材･工法･機器の発注動向," http://www.mlit.go.jp/common/000143830.pdf（2017/7/14 アクセス）

（平成 29 年 3 月 27 日受付，7 月 15 日再受付，
8 月 31 日早期公開）



田中　悠大

平成 27 年静岡大学工学部システム工学科卒業．現在静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻在学中．下水管検査のための無線センサネットワークに関する研究に興味をもつ．情報処理学会学生会員．



武居　悠樹

静岡大学工学部システム工学科在学中．下水管検査のための無線センサネットワークに関する研究に興味をもつ．情報処理学会学生会員．



石原　　進　（正員）

平成 6 年名古屋大学工学部電気工学科卒業．平成 11 年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了．平成 10 年日本学術振興会特別研究員．平成 11 年静岡大学情報学部助手．平成 13 年同大学工学部助教授．平成 26 年カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員．現在，静岡大学学術院工学領域准教授．博士（工学）モバイルアドホックネットワーク，センサネットワークに関する研究に従事．IEEE，ACM 会員．情報処理学会シニア会員．