

直径 200mm 下水管内における 浮流無線 LAN 端末の詳細位置推定

武居 悠樹¹ 住山 真² 西島 達哉² 劉 志³ 石原 進³

概要: 日本では下水管の老朽化が進み, その検査と整備が急務となっているが, 現行の下水管検査手法はコストなどの面で様々な問題を抱えている. 筆者らは, 短時間・低コストの検査が可能な新しい下水管検査手法として, 複数の浮流型観測機を用いた下水管内映像伝送システムを提案している. このシステムでは, 下水管内に投入されたカメラ付き浮流観測機が撮影した管内の映像を, マンホール下のアクセスポイント (AP) を介して無線通信を用いて回収し, その映像に基づいて検査を行う. 映像を利用した検査のためには映像が撮影された位置の情報が必要だが, 下水管内は衛星からの電波が届かず GPS が利用できないため, 管内を浮流する観測機の位置を何らかの方法で特定する必要がある. 本研究では, 直径 200mm の下水管内における浮流型観測機の受信信号強度 (RSSI:received signal strength indicator) を用いた位置推定の実現可能性の調査のため, 模擬下水管環境で実際に水流によって移動する端末の RSSI を計測する実験を行った. 実験の結果, 管内での RSSI の変化は, 浮流端末が AP に近づく間は単調増加し, AP から離れる際には単調減少することが確認された. また, 計測値の分布の様子から, 誤差 1m オーダーでの位置推定の実現可能性が示唆された.

Accurate position estimation of a drifting wireless lan communication device in a 200mm-diameter small sewer pipe

Yuki Takei¹ Shin Sumiyama² Tatsuya Nishijima² Zhi Liu³ Susumu Ishihara³

1. はじめに

今日, 日本の下水管の老朽化は深刻な問題である. 国内の下水管の総延長 47 万 km のうち 40%以上が耐用年数である 30 年を超えて設置されている [1][2]. また, 老朽化下水管を原因とした道路陥没事故が年間 3000 件以上発生している [3]. こうした中で, 老朽化下水管の早急な検査と危険箇所への補修・交換が必要とされている. 現在の下水管検査では目視検査 [4], 管口カメラ [5], 有線ロボット [6], 船型カメラ [7] などの検査手法が中心に用いられている. しかしながら, これらの手法が金銭的・人的に高いコストを伴うために検査の進行度が低く, 年間の検査延長は総延長の 1%程度にとどまっているのが現状である [3]. 今後も増加する老朽管に対して早急に検査を行うため, 低コスト・

短時間で検査が可能な下水管検査手法の開発が必要とされている [8].

石原らは, 低リスク, 低コスト, 短時間の検査を可能とする新しい下水管検査手法として, 浮流型観測機を用いた下水管検査システム (図 1) を提案している [9]. このシステムでは, 検査対象の下水管内をカメラ/センサ搭載の浮流型観測機が撮影し, 下流のマンホール下に設置されたアクセスポイント (AP) が, 無線通信によって映像データを回収する. 検査員は事前に検査範囲のいくつかのマンホールに AP を設置し, その後, 検査範囲の上流のマンホールから野球ボール大の浮流型観測機を複数投入する. 浮流型観測機は管内を流れながら管の内側の映像を撮影し, 各 AP の下を通過するたびに, 直前の AP との間で撮影した映像データを直上の AP へ転送する. AP は回収した映像データをセルラー通信経由でオンラインサーバへ転送し, 検査員はサーバ上の映像データをチェックして検査を行う. 浮流型観測機は検査範囲の下流で回収され, AP も検査後に

¹ 静岡大学大学院総合科学技術研究科工学専攻

² 静岡大学工学部数理システム工学科

³ 静岡大学大学院工学領域

撤去される。

本システムによる検査は、検査員がマンホール内に入っていく作業がないため安全である。また、現地で検査に使用する機器はノードと AP のみであるため、現行の検査手法に比べ機器コストが低い。さらに、検査対象の下水管の止水や洗浄などの大掛かりな事前作業が必要ないため、検査に必要な時間が比較的短い。加えて、浮流型観測機が撮影した映像を準リアルタイムで確認できるため、撮影の失敗や浮流型観測機の故障を素早く把握でき、再検査実施までの検討時間が短く済む。筆者らは、様々な直径の下水管の中でも特に敷設延長の長い直径 200mm の下水管の検査を前提に研究を進めている [10]。

当システムを利用した検査のためには、撮影映像から管の損傷箇所を特定するため、浮流型観測機が撮影した映像と下水管内における撮影位置の情報とが紐付けられなければならない。筆者らは、浮流型観測機がタイムスタンプと共に自身の位置を記録し続け、撮影映像のタイムスタンプと照合することで映像に位置情報を付加する方法を検討している。しかし、下水管は地下に設置されており、GPS 衛星の電波を受信できないため、他の何らかの方法で浮流型観測機の位置情報を取得しなければならない。筆者らは、浮流型観測機の撮影映像を解析してマンホールを検出し、検出したマンホールの座標と下水流の流速に基づいて浮流型観測機の位置を推定する手法を検討している [11]。しかし、撮影と画像解析を同時に実行するのは計算機資源の消費が激しく、限られたバッテリーで駆動する浮流型観測機の位置推定としては不向きであることも考えられる。そこで筆者らは、浮流型観測機が AP から受信するビーコンの RSSI を利用して位置を推定する手法も同時に検討している [12][10]。

RSSI を利用した位置推定では、浮流型観測機がビーコンの RSSI の強弱に基づいて AP と自身との端末間距離を推定し、この端末間距離と固定された AP の位置座標を基に自身の座標を推定する。直径 200mm の下水管内ではビーコンの到達距離が短く、5GHz 帯を使用する場合 8m 程度となるため、浮流型観測機は AP と接近したタイミングでのみビーコンを受信することができる。したがって浮流型観測機の位置推定は間欠的に行われ、ビーコンが受け取れない範囲で撮影された映像には、AP 直下と推定される位置を基準に、タイムスタンプと管内の流速を基に位置情報が付与される。本稿では、RSSI を利用した位置推定の実現可能性を探るために行った、実験用下水管の中で実際に無線通信端末を流し、固定 AP から受信するビーコンの RSSI を計測する実験について報告する。

本稿の要点は以下の通りである。

- (1) 浮流型観測機が AP から受信する RSSI を実験用下水管内で計測し、水流による浮流型観測機の移動に伴う RSSI の変化を観測した。

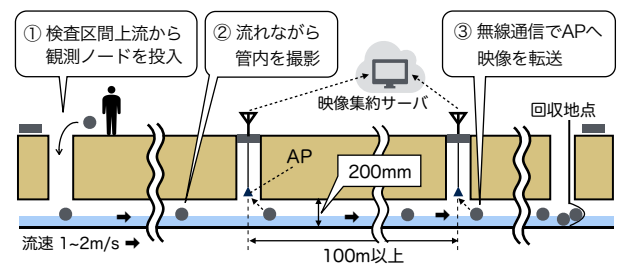


図 1 浮流無線カメラノードを用いた映像伝送システム

- (2) 実測結果より、移動に伴う RSSI の変化は単調であることを確認し、同一の RSSI の計測地点のずれが 1.9m 以内であることを確認した。

以下、2 章で本稿での議論に関連する研究について述べる。3 章で模擬下水管内で実施した実験とその結果について述べ、4 章に考察を述べる。最後に 5 章でまとめを述べる。

2. 関連研究

2.1 第 1 フレネルゾーンと地中配管内の電波伝搬

第 1 フレネルゾーンとは、送信機から発射された波長 λ の電波が最短経路で受信機まで到達する場合の経路長と、迂回経路を通して到達する場合の経路長の差が $\lambda/2$ 以内になる範囲 (図 2) のことである [13]。定義からわかるように、第 1 フレネルゾーンは、通信周波数が低いほど大きく、高いほど小さい。またこの空間は、送信機と受信機のそれぞれのアンテナを両端とする回転楕円体であるため、送信機と受信機との距離が広がるほど大きくなる。通信に対する障害物が第 1 フレネルゾーンの 40% 以上を占めている場合、電波減衰の影響が大きくなり、安定した無線電波通信が困難になる。逆に第 1 フレネルゾーン内に十分な空間があれば、通信の見通しが確保されていると言える。

アンテナ間の距離が同じ場合、通信の見通しを確保するために必要な空間は、高い周波数帯を使用する場合の方が小さい。下水管のような地中の配管内での無線電波通信では、空気による減衰の影響よりも、通信の見通しが確保できないことによる電波減衰の影響が大きく、高い周波数帯を使用して通信した方が通信可能距離が長くなる [15]。直径 200mm の塩ビ管でもこの現象は確認されており、長島らの検証によれば、底の深さが 40cm になるように管が埋

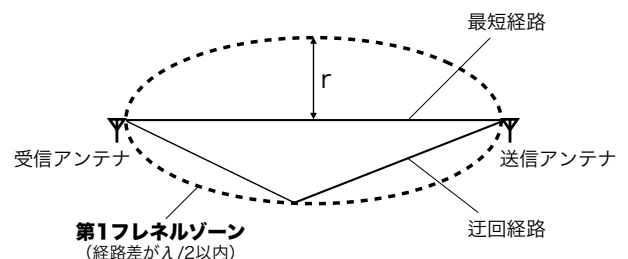


図 2 第 1 フレネルゾーン

められている場合、920MHz 帯、2.4GHz 帯を使用した場合の通信可能距離は約 3m であるのに対し、5GHz 帯を使用した場合は約 8m まで通信が可能である [14]。

2.2 無線電波通信を用いた管渠施設の検査

無線センサネットワークを用いた管渠設備の検査手法は現在、活発に研究・開発が行われている。Stoianov らが提案する PipeNet[16] や、Kim らが提案する SPAMMS[17] は、検査対象の管の内外に設置された固定センサのセンシングデータに基づいて管渠設備の検査を行うシステムである。これらの手法による管渠設備の検査を実施するためには、あらかじめ管渠設備に各種センサなどを設置する必要がある。

Kim らは、マンホール裏のビーコン発信器と管内を流れる浮流センサ端末によって硫化水素濃度のセンシングを行うシステムである SewerSnort[18] を提案している。この手法では、浮き輪型の外殻を備えた浮流センサが水流によって移動しつつ管内のガス濃度のセンシングを行う。浮流センサは、マンホール下に設置された発信器からのビーコンの RSSI を基に自身と発信器との距離を推定し、ビーコンに含まれる発信器の位置情報から自身の位置を推定する。RSSI を用いた発信器との距離の推定では、コンクリート排水管内における電波伝搬モデルによる近似 [19] と、Empirical Mode Decomposition (EMD)[20] による測定ノイズの除去を利用している。筆者らは直径 1.5m と 1.8m のコンクリート管を検査対象に想定しており、実験用の模擬下水管内で、誤差率 5% 以下の精度で浮流センサの位置を推定できたことを確認している。

2.3 カルマンフィルタを用いた地下配管内位置推定

Wu らは、地下配管内のロボットが、地上の発信器から発せられたビーコンの RSSI とロボット自身に搭載した慣性計測装置 (IMU) から得られる速度情報を基に位置推定を行いつつ管渠検査を行うシステムを提案している [21]。提案システムでは、ロボットは地上からのビーコンの RSSI と IMU の情報を基に、Extended Kalman Filter (EKF) を用いてロボットの位置推定精度の改善を試みている。著者らは、直径 100mm の地下配管内を想定したシミュレーションによって 0.01 秒ごとのロボットの位置を推定し、EKF によって位置推定結果が改善され、測定誤差と同程度の誤差での位置推定が可能であることを確認している。

3. 模擬下水管環境における無線通信実験

浮流型観測機を水流によって移動させつつ、AP から発信されたビーコンの受信信号強度を観測するため、直径 200mm の実験用下水管内で 5GHz 帯の無線通信を利用した実験を行った。

片方端末浮流時の RSSI 測定

ポンプで作り出した水流によって送信端末を移動(約0.28m/s) 送受信端末間で0.1s刻みでのRSSI測定

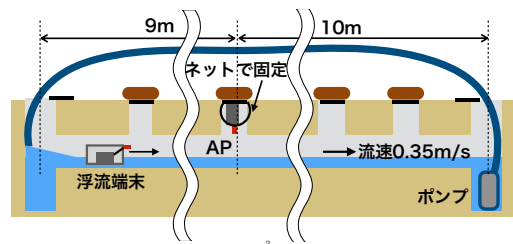


図 3 実験用下水管概略図



図 4 学内に設置した実験用模擬下水管



図 5 防水ケースに入れた実験用浮流端末と外部に固定したアンテナ

3.1 実験環境

図 3 に示すように、大学構内の土中に VU 管を埋めて模擬的に下水道環境を再現した。模擬下水管には長さ 22m、直径 200mm の塩ビ管を使用し、地表から管の底までの深さが 400mm となるように埋設した。管には実験作業のため 1m ごとに縦穴が配置されており (図 4)、実験中は縦穴に蓋をした上へ砂嚢を置き、管外へ電波が漏れ出ないようにした。管の両端には直径 60cm、深さ 2m のますを設置し、一方のますからもう一方のますへポンプで水を送り続けることによって管内に水流を発生させた。

小型 Linux コンピュータの Raspberry Pi Model B に、IEEE 802.11n 規格に対応した無線通信 USB ドングル GW-450D (Planex 社製) を USB 延長ケーブル越しに接続し、

無線通信端末とした。また、端末への給電のため、Raspberry Pi とほぼ同サイズのバッテリーを使用した。実験では、浮流端末と AP としてこれらの無線通信端末を 2 セット使用した。

模擬下水管は地中に埋められており、管内で発せられた電波は管外へ漏れ出ない環境であるため管内を屋内環境とみなし、実験では W52 帯の 36ch (中心周波数 5.18GHz) を使用した。

3.2 測定方法

管内に発生させた水流によって無線通信端末を移動させながら、固定された AP 側の端末からのビーコンの RSSI を計測した。AP 側では、無線通信端末とバッテリーを防水用のビニール袋に入れ、アンテナが管の上面の高さに固定されるように網で支えて設置した。浮流端末側では、無線通信端末とバッテリーを防水のケースに入れ、アンテナはケースの外側に固定し、管内を流れる際にアンテナがなるべく管断面の中央に近づくようにした (図 5)。

計測のためポンプを使用して管内に水深が 4cm となるような水流を発生させた。一般的な下水道の流速は 1m/s から 2m/s だが、管の構造上 0.3m/s 程度の流速が限界であり、この速度で実験を行った。計測時には、実験管の両端の縦穴の蓋を開け、一方の端から浮流端末を投入し、もう一方の端へ到達するまで流し、端末が流れている間に管内でビーコンの受信信号強度を計測した。AP は、浮流端末を投入する側の端から 9m の地点に設置した。計測時には、管内へ浮流端末を投入してからもう一方の端へ到達するまでの経過時間も合わせて計測した。また、実験時には屋外の気温、湿度、実験管内の気温、湿度、さらに実験管周辺の土壤水分量を計測した。

実験は冬季 (2017 年 2 月) と春季 (2018 年 5 月) の 2 回実施した。RSSI の計測は各日程で計 5 回ずつ行った。水流を発生させるポンプの出力は日程ごとに一定に保っていたため、同じ日程の計測は同じ流速で実施されているが、管内への浮流端末の投入を手動で行っているため、浮流端末の初速は計測ごとに若干のずれが生じている。

RSSI の計測には、浮流端末上で Linux の無線 LAN 管理コマンドの iwconfig を使用し、管内への投入後、春季は約 40 ミリ秒に一回、冬季は約 120 ミリ秒に 1 回のペースで計測した。また、浮流端末の動きを大まかに把握するため、全計測の終了後に実験管の縦穴を全て開き、計測時と同じ流速の水流に浮流端末を流し、1m ごとに通過時刻を記録する計測を複数回行った。

3.3 実験結果

春季の実験の計 5 回の測定結果を図 6 に示す。グラフは縦軸が RSSI を dBm 単位で、横軸が経過時間を秒単位で示している。実験当日は、屋外の気温 27.0 度、湿度 35.7%、

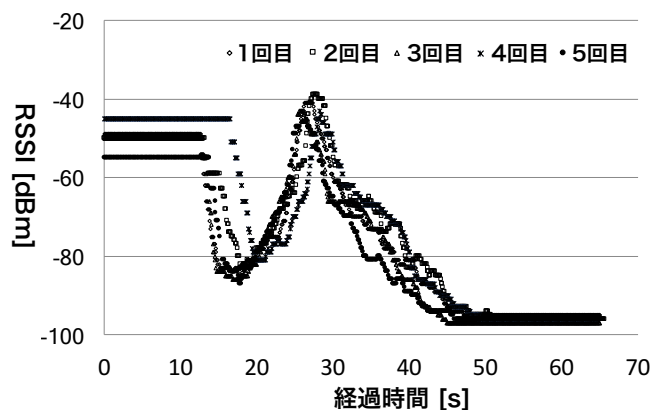


図 6 浮流端末投入後の経過時間と RSSI の関係 (春季)

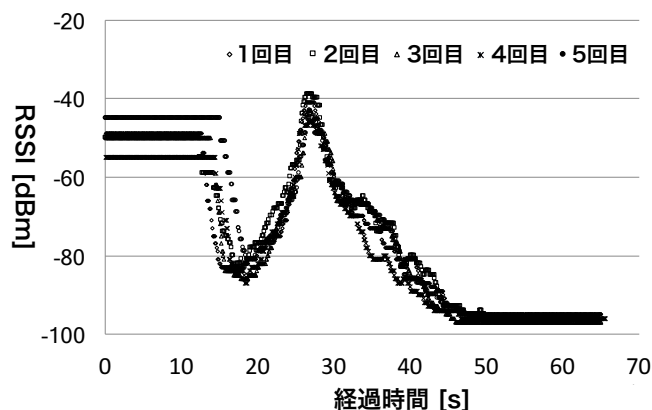


図 7 各計測の RSSI 最大値の計測時刻を一致させたグラフ

管内の気温 25.4 度、湿度 68.6%、実験用下水管周囲の土壤水分量は平均 40.6%だった。

全ての計測で、経過時間 0 秒から 15 秒近くまでそれぞれ -50dBm 付近で一定の受信信号強度を示しているが、この時間帯の浮流端末は AP から 5m 以上離れており、これまでの実験などから特に開口部などがない場合にはこの地点で RSSI が -50dBm になることは考えられないため、本来の RSSI とは異なる数値を示しているものと判断した。これは、浮流端末を投入する開口部から混入する電波の影響か、実験操作に伴う無線通信システムのエラーが影響したものと思われる。

経過時間 20 秒付近で各計測の RSSI は極小値を取り、その後上昇していく。経過時間 20 秒付近の浮流端末は AP から 3m 程度の位置を AP に向かって近づく方向に移動しているため、極小値を取った後の計測値は実際の RSSI を計測しているものと判断した。全ての計測で 27 秒付近で RSSI の最大値を観測し、その後減少していく。実験時の流速は 0.35m/s であったため、計測開始から 27 秒後の浮流端末は投入口から約 9.45m の地点を流れていたものと考えられ、AP のほぼ真下で受信信号強度の最大値を観測していることがわかる。

RSSI の最大値が観測された時刻は計測ごとに差があり、最大で約 2.5 秒の差があった。これは計測の誤差の他に、

手動で浮流端末を投入した際に発生する初速の差も含まれているため、計測誤差による RSSI 最大値の観測時刻の差は 2.5 秒よりも小さいものと考えられる。各計測での RSSI の最大値は異なっており、最大で 4dBm の差があった。これは、計測の各回で浮流端末が流れていく姿勢が異なり、浮流端末のアンテナと管断面の中心との距離や角度が異なっていたことや、RSSI が最大となる瞬間の水面の状況が異なっていたことで AP との間の通信環境が異なっていたことなどが影響したものと考えられる。

RSSI が最大となった後、全ての計測で RSSI は低下し、50 秒以降は -95dBm で一定となっている。RSSI が一定となっている部分ではすでに端末間の通信は途絶して正しい計測値ではないものと判断すれば、浮流端末がビーコンを受信できていたのは投入後 50 秒程度までである。50 秒付近では浮流端末は管の端から約 15m の地点を流れており、浮流端末は AP を通過した後 6m 程度まではビーコンを受信できていたものと考えられる。

4. 考察

今回の実験結果から、RSSI の変化は、AP に近づく際には単調増加し、離れる際には単調減少することが示され、また、同一の RSSI の測定時の端末位置のずれは、1.9m 程度に収まっていた。一般的に、通信端末間の距離の増加に伴う RSSI の減少は単調減少にならず、ある程度の幅で振動しながら減少していく。先行研究において実施された直径 200mm の地下配管内での電波伝搬のシミュレーションにおいても、各地点の RSSI が距離の増加に伴い振動しながら減衰していく様子が観察されていた。しかしながら今回の実験では、ほぼ全ての計測結果において、RSSI が最大になる前の測定値は振動することなく最大値に向けて単調増加し、最大値の観測後は時折横ばいになりつつ、単調減少していた。RSSI を用いて位置推定を行う場合、RSSI の変化が単調であることがわかっているならば、RSSI の計測値から位置を一意に推定することができるため、位置推定の実現に向け有用な情報を得られたと考える。しかし一部の結果でわずかながら計測値の振動が見られたため、今後はこの振動が発生する条件などの特定が必要である。

前項で述べた通り、RSSI 最大値を観測した時刻の差は、実験の手動操作による誤差を含めても 2.5 秒程度で、この時間差は距離にすると 0.9m に相当する。図 7 は、図 6 のグラフの各計測の経過時間をシフトして、各計測の RSSI の最大値を計測した時刻を一致させたものである。グラフの形状からわかる通り、同一の RSSI を計測した時刻は計測ごとに異なっている。その差は RSSI 最大値の観測時刻から速さかほど大きく、つまり浮流端末と AP の距離が離れるほど大きい。したがって、浮流端末と AP との距離が大きい時ほど位置推定の精度は悪くなるものと考えられる。RSSI が同一となるの時刻の差が最も大きいのは、浮

流端末が AP から離れながら -80dBm を記録した時刻で、5.5 秒間離れている。したがって、実験時の流速から判断すれば、同一の RSSI を測定した端末位置のずれは、1.9m 程度の範囲に収まっていたことがわかる。これらのことから、実験時の環境では、本実験の実験結果に基づいて誤差 2m 以内で浮流端末の位置推定が可能であると言える。

実際の下水管の環境と実験時の環境は当然異なるため、本実験の実験結果をそのまま実際の下水管内での位置推定に応用することはできない。しかし、事前に AP 周囲の受信信号強度の変化を一定回数計測することで、誤差 1m のオーダーで位置推定が可能であることが示唆された。

5. まとめ

本稿では、直径 200mm の塩ビ製下水管内での RSSI を利用した観測端末の位置推定の実現可能性を探るため行った模擬的な実験用下水管の中で実際に無線通信端末を流し、固定 AP から受信するビーコンの RSSI を計測する実験について報告した。計測の結果、浮流観測機の移動に伴うビーコンの RSSI の変化は、浮流型観測機が AP に近づく際には単調増加し、AP から離れる際には単調減少することを確認した。また、同一の RSSI の計測地点のずれが 1.9m 以内であることを確認した。これらの結果から、実際の下水管環境においても、事前に AP 周囲の RSSI の変化を一定回数計測することで、誤差 1m のオーダーで位置推定が可能であることが示唆された。

今後は浮流型観測機のアンテナの位置と RSSI の変化の傾向の関係を観測機の試作機を用いて検証するとともに、マンホールサイズの下での RSSI の変化の傾向を確認するなどして、直径 200mm の下水管内での RSSI を用いた位置推定の実用化に目処をつけていく予定である。また、カルマンフィルタなどの数値処理による推定精度の改善、評価を検討する予定である。

謝辞

本研究は、総務省戦略的情報通信開発推進事業 (SCOPE) の助成の下で実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 国土交通省: 計画的な改築・維持管理. http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000135.html (2016/11/15 確認)。
- [2] 日本ヒューム株式会社: 下水道管路診断 <http://www.nipponhume.co.jp/technology/check.html> (2018/5/13 確認)。
- [3] 長澤靖之: 上下水道が一番わかる, 技術評論社 (2012)。
- [4] 株式会社東利: 工事事例-目視調査. <http://www.tohri-net.co.jp> (2017/02/12 確認)。
- [5] 東芝テリー株式会社: ハードケーブルカラーカメラシステム. <http://www.tohri-net.co.jp> (2017/02/12 確認)。

- [6] 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> (2017/02/12 確認).
- [7] 関根勇: ストリーム・カメラシステムによる幹線管きよの TV カメラ調査について, 月間下水道, Vol. 34, No. 3, pp. 55–58 (2011).
- [8] 国土交通省国土技術政策総合研究所: 下水道革新的技術実証事業 http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/mizukokudo_sewerage_tk_000450.html (2017/03/10 確認).
- [9] 石原進: 間欠通信を行う流れるセンサ群からの情報収集に関する一考察, 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信, Vol. 2010-MBL-56, No. 22, pp. 1–7 (2010).
- [10] 石原進, 武居悠樹, 劉志, 前田拓磨, 澤野弘明: 下水管路検査用浮流型無線ネットワークカメラシステムの実現技術, 情報処理学会研究報告, マルチメディア通信と分散処理, Vol. 2017-DPS-172, No. 4, pp. 1–8 (2017).
- [11] 清水峻太, 前田拓磨, 澤野弘明, 石原進: 下水管映像分割のためのマンホール検出方法の提案, 情報処理学会第 80 回全国大会, 2R-06 (2018).
- [12] 住山真, 武居悠樹, 劉志, 石原進: 無線 LAN 受信信号強度を用いた下水管内自己位置推定に関する基礎検討, 電気電子通信学会 2018 年総合大会, B-18-19 (2018).
- [13] 高田潤一: 電波伝搬の基礎理論, Microwave Workshops and Exhibition (2005).
- [14] Nagashima, T., Tanaka, Y., Ishihara, S.: Measurement of Wireless LAN characteristics in sewer pipes for sewer inspection systems using drifting wireless sensor nodes, *IEICE Trans. on Communications*, Vol. E99-B, No. 9, pp. 1989–1997 (2016).
- [15] 山口芳雄, 阿部武雄, 関口利男: トンネル内の基本モードの伝搬特性, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. 65, No. 4, pp. 471–476 (1982).
- [16] Stoianov, I., Nachman, L., Madden, S. and Tokmouline, T.: PIPENET: a Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring, *Proceedings of the 6th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, IPSN '07, ACM, pp. 264–273 (2007).
- [17] Kim, J. H., Sharma, G., Boudriga, N. and Iyengar, S. S.: SPAMMS: a Sensor-based pipeline autonomous monitoring and maintenance system, 2010 Second International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2010), pp. 1–10 (2010).
- [18] Kim, J., Lim, J. S., Friedman, J., Lee, U., Vieira, L., Rosso, D., Gerla, M. and Srivastava, M. B.: SewerSnort: A drifting sensor for in-situ sewer gas monitoring, 2009 6th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, pp. 1–9 (2009).
- [19] Khan, S., Howitt, I., Khan, J.: Lumped parameter radio wave propagation model for storm drain pipes, (2009).
- [20] Huang, Norden E., Shen, Z., et al.: The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis, Royal Society of London Proceedings Series A, Vol. 454, No. 1971, pp. 903–995 (1998).
- [21] Wu, D., Chatzigeorgiou, D., et al.: Node Localization in Robotic Sensor Networks for Pipeline Inspection, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 809–819 (2016).
- [22] Arslan, Mustafa Y., et al. Auto-configuration of 802.11n WLANs, Co-NEXT '10 ACM Proceedings of the 6th International Conference, Vol. 27, pp. 1–12 (2010).
- [23] 前田拓磨, 林友貴, 澤野弘明, 石原進: 下水管内検査のための浮流式全方位カメラシステムの検討, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2016) シンポジウム, pp. 212–219 (2016).
- [24] Angelakis, V., et al.: Adjacent channel interference in 802.11a is harmful: Testbed validation of a simple quantification model, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 3, pp. 160–166 (2011).
- [25] Dugan, J.: iPerf – The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP. <https://iperf.fr/> (2017/03/10 確認).