

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540034

研究課題名(和文) 下水道の短期間検査のための複数浮流ノード連携によるビデオ伝送システムの開発

研究課題名(英文) Development of a video transmission system using multiple cooperative drifting nodes for fast sewer inspection

研究代表者

石原 進 (Ishihara, Susumu)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：10313925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：老朽下水管のスクリーニング検査のための複数浮流ノードによる下水管内ビデオ撮影・伝送システム実現をめざした要素技術の開発を行った。下水管内の無線通信特性を測定し、4cm程度の深さの水を含む直径200mmの管内では、5GHzの電波を使用するIEEE802.11aが、2.4GHz帯、920MHz帯を用いる方式よりも長い通信可能距離(10mW/Hzで8m)を達成できることを確かめた。また、映像データを確実に回収するための複数ノードの連携によるデータ転送プロトコルを設計した。浮流型カメラ内蔵観測ノード、映像に生ずる水平方向の回転を補正する画像処理技術を設計し、実験によってその効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：We developed elemental technologies for realizing a cost-effective fast video inspection system for underground sewer systems with multiple drifting nodes. We measured wireless communication characteristics in a underground 200mm-diameter pipe and confirmed that IEEE802.11a using 5GHz radio band achieves a longer communication distance (8m at 10mW/Hz) than other radio systems using 2.4GHz and 920MHz bands. We designed data transfer protocols for reliably retrieving video data from drifting camera nodes. One protocol is for uses multi-hop communication from a camera node to an access point via multiple relay nodes and another is for multiple cooperative camera nodes. We also designed drifting camera nodes and a video processing method for compensating the rotation of a camera in a drifting node, and confirmed the effectiveness of them.

研究分野：情報通信工学

キーワード：無線LAN 下水管検査 センサネットワーク 動画画像処理 回転補正 移動カメラ 間欠的通信

1. 研究開始当初の背景

研究開発開始当初の時点で、全国で 44 万 km の下水管設備があるが、整備後既に 30 年を経過した管路は 12 万 km におよび、今後 10 年でさらに 10 万 km 以上が加わる。過去 10 年で下水道管路施設に起因した陥没事故が全国で年間約 4~6000 件起きており、多数の老朽下水管路の検査と整備が急務である。ところが従来のマニュアル操作ロボット等による検査では 300m/日が限度であり、高コストのために、多くの自治体が広域の検査を実施できない状況にある。近年、船型のビデオカメラ搭載観測機(旧式ビデオデッキ 大~)を用いた比較的高速な検査手法が一部の自治体で導入されつつあるが、この方法でも管内の段差の通過のために手で観測機を操作する必要があり、観測速度は 1km 弱/日程度にとどまっている。また大口径管では人間による検査を行う自治体も多いが、この作業は有毒ガスによる中毒死の危険と隣り合わせである。

下水管検査の省力化のために、無線センサネットワークを利用する試みはいくつか行われているが、目視、あるいは映像の確認に基づく検査を置き換える手法は確立されていない。米国 UC Irvine の低容量データを用いた固定型センサによる下水管監視システムや、UCLA によるガスセンサ搭載浮流ノードによる検査システムの提案があるものの、無線伝送映像を用いた検査システムの開発はなされていない。下水管内での長距離・大容量の無線データ転送を行うためには、1 ホップでの伝送が電波伝播条件による制約から容易ではないので、マルチホップによるデータ伝送を用いることが考えられる。しかし、無線マルチホップネットワークにおける送信スケジュール、経路制御 技術に関しては、過去に多く研究が行われているが、下水管環境での実用化研究は例がない。加えて、下水管環境での無線 LAN 技術を用いたデータ伝送の事例も殆どない状況だった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、急務である老朽下水管のスクリーニング検査(短期間簡易検査)の実現技術として、複数の浮流ノードによる下水管内ビデオ撮影・伝送システム実現技術を実現することである。これにより従来型の観測技術の半分以下の期間と人件費での観測を可

能とすることを目指した。本システムでは、図 1 のように上流のマンホールのある箇所から投入した無線通信機能付きカメラ付き浮流ノード(観測ノード)、およびビデオデータ無線伝送用の複数のノードにより、投入口および管路途中のアクセスポイントからのリアルタイムビデオモニタリングを行いながらの観測を可能とする。下水管内の無線通信可能距離は陸上に較べて大幅に短くなるため、アクセスポイントと観測ノード間の接続性を常に維持することは困難である。そこで、マルチホップによるデータ転送、複数の観測ノードによる観測データの分散型でのデータ転送などの手法を用いて、限られたアクセスポイントとの通信機会しかない状況でも確実にデータを転送できるようにする。

また、回転・垂直方向移動もするカメラノードでのビデオデータを姿勢 情報に基づいて補正し、視線が安定した映像を生成、異常箇所の特特定を可能とする。

二年間の研究期間の間に以下の目標を達成することを目指した。

- 1) ソフトボール大の防水管体に格納可能なカメラ搭載浮流ノードの実現
- 2) 下水管内でのノードの故障発生、不適切なノード配置がある条件でも適切な中継ノード選択とチャネル選択を行い、継続してビデオデータ伝送可能な経路を維持するプロトコルの実現
- 3) 不安定な条件で撮影されたビデオ映像を複合センサ情報を元に安定した映像に変換する技術の構築。特にオフライン環境における単一ビデオ映像による超解像度化・三次元復元の実現
- 4) 下水管内の異常を瞬時に視認可能な閲覧支援システムの開発

3. 研究の方法

以下の二つのサブテーマに関して、研究代表者と分担者で分担して研究を進めた。

- 1) 下水管内無線マルチホップ高信頼ビデオ伝送ネットワーク構築技術の開発(静岡大:石原)

静岡大学内農場に実験用の直径 25mm の下水管を布設し(最終的に 12m)、この環境で、各種の無線 LAN 装置、周波数帯、アンテナを用いた無線伝送実験を行い、各条件における通信可能距離と、伝送速

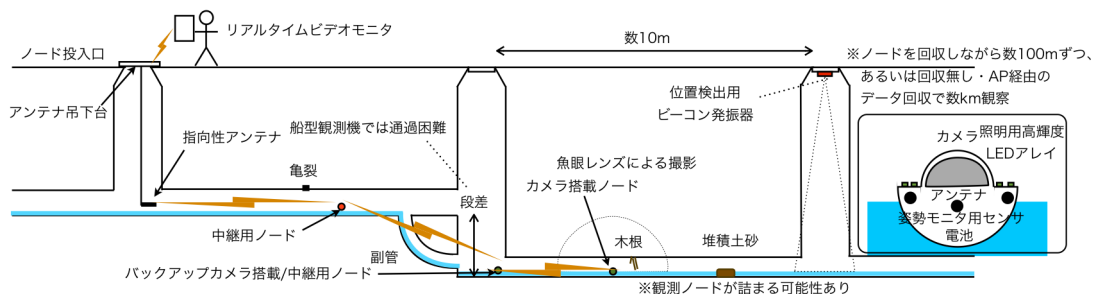


図 1. 本研究での目標システム

度、通信品質を調べた。また小型 Linux コンピュータ Raspberry Pi とビデオカメラを用いた観測ノードプロトタイプを設計し、ビデオ転送プロトコルのプロトタイプ実装を作成し、これを改良する形でビデオデータ転送プロトコルの開発を進めた。

2) 浮流カメラ撮影ビデオの解析技術の開発 (愛知工業大:澤野)

下水管内を浮流しながら安定した条件でビデオ映像撮影を行えるような観測ノードの設計を行った。CAD による設計と、仮想空間における移動シミュレーション、実験下水管での移動・撮影実験を通して、撮影系設計の改善をすすめた。また、これらの撮影系から得られる動画像の回転補正アルゴリズムを設計し、実験下水管での実験を通してアルゴリズムの改良を行った。

4. 研究成果

(1) 下水管内の無線通信特性の測定

市販の ISM 帯の無線 LAN 製品と農場内に布設した実験用下水管を用いた実験により、下水管内の無線通信特性を測定し、浮流観測ノードで使用するべき通信周波数帯、変調方式、アンテナ仕様に関して知見を得た。下水管内での無線 LAN 通信特性に関しての測定をまとめた事例は本取り組みの他になく、本研究でえた測定結果は、貴重である。

狭い下水管内は電波伝搬の条件が地上と大きく異なり、一般的常識である周波数が低いほど長距離での通信が容易であるという仮定が成り立たない。自由空間における伝搬損失は距離の 2 乗に比例し、波長の 2 乗に反比例する。したがって、周波数が低いほど通信可能な距離は長くなる。しかしながら、自由空間における伝搬損失の式は、一般に第 1 フレネルゾーン半径の 60%以内に障害物がないときに適用できるものであり、下水管内でこの条件を満たすのは困難である。第 1 フレネルゾーン半径の 60%は、周波数が低いほど、アンテナ間の距離が長いほど大きくなる。これは、周波数が低いほど第 1 フレネルゾーン半径内に障害物が入りやすくなり、見通し確保が困難であることを意味している。すなわち、周波数が高いほど通信可能距離は長くなると言える。また、下水管の内部では、管壁の汚れや汚水、物、堆積物による電波の反射・吸収が生ずる複雑なマルチパス環境となっていると考えられる。

図 2、表 1 に通信実験用下水管の構成と実験の諸元および測定結果の概要を示す。また、図 3 に 2.4GHz と 5GHz 帯で IEEE802.11g/a におけるデータレート毎のスループット測定結果を示す。これらの測定では iperf での UDP データ送信を用い、ノードは各地点で静止させた。

一連の測定により、以下の知見が得られた。

- 埋設した直径 200mm の塩化ビニル管内で

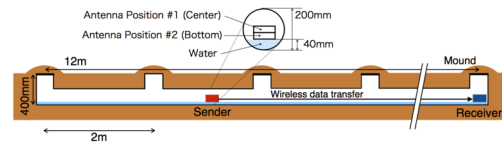


図 2 下水管内無線通信実験環境

表 1. 無線通信実験に使用した機器の仕様と下水管内での最大通信距離

帯域 [Hz]	L1-L2 標準	デバイス	送信電力	アンテナ	最大通信距離
920M	ARIB STD T-108	東朋テクノロジー TMJ0914	10mW	O 3dBi	3m
2.4G	IEEE 802.15.4	Digi XBee Pro	10mW / MHz	O 1.65dBi	3m
		Planex GW450D	10mW / MHz	D 8dBi	5m
		Planex GW450D	10mW / MHz	O 3dBi	3m
5G	IEEE 802.11a	Planex GW450D	10mW / MHz	O 3dBi	8m
		Planex GW450D	10mW / MHz	D 8dBi	5m

※最大通信可能距離はアンテナを管中央に配置した場合の値。
※ O: Omni-directional, D: Directional

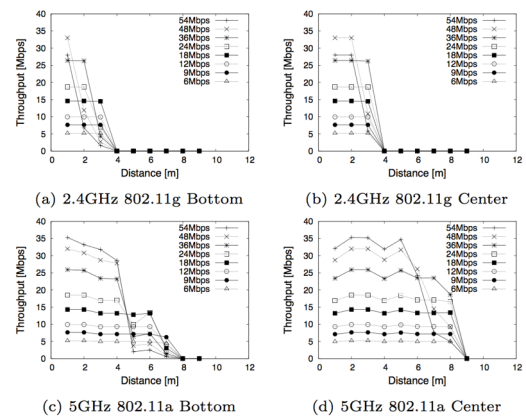


図 3. 下水管内無線通信実験の結果

は、5GHz を用いる IEEE802.11a が、2.4GHz 帯を用いる IEEE802.11g、920MHz 帯を用いる ARIB-T108 よりも長い通信可能距離を達成できる。

- 水面の位置に端末を配置した場合よりも、端末を高く設置して管中心部にアンテナが置かれるように配置したときの方が通信可能距離が長くなる。これは、管壁からアンテナまでの距離が遠くなることで、フレネルゾーンが遮られる割合が減るためである。
- 下水の流速を想定した速度で端末を移動させた場合でも、端末位置とスループットの関係は端末静止時とほぼ同じである。
- 指向性アンテナを使用すると、通信可能距離を延長できる (IEEE802.15.4 で 3m から 5m に延長)。

(2) 下水管内映像伝送プロトコルの設計

下水管内での浮流観測ノードが観測した映像データを回収するための通信レートの選択、複数ノードの連係によるデータ転送 (マルチホップ型の転送と複数の観測ノードを用いた分担型のデータ転送の②方式) について設計を行った。

①通信レートの選択

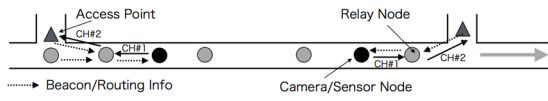


図4. マルチホップ転送によるアクセスポイントとの接続性確保

より多くのデータ転送量を達成するには、リンク状態に応じて、適切な物理層データレートをを用いるべきである。無線 LAN のためのレート適応手法は過去に多く提案されているが実用的な手法の多くは対象の端末とアクセスポイントだけでなく、他の端末による干渉波の影響を考慮してレートを選択する。しかしながら、下水管内部では、目的を同じとする観測ノード群のみを扱うので、これらを協調動作させ、観測ノード同士による同時通信をアプリケーションレベルで回避することは可能である。したがって、端末 1 台とアクセスポイントのみの間の通信路状態のみに着目してレートを選択すれば良い。

図 3 より、5GHz 帯で IEEE802. 11a を用いたとき、端末・アクセスポイント間距離 5m 以下でデータレート 54Mbps、5m より長く 8m 以下ではデータレート 24Mbps を用いるようにするならば、ノードの移動速度が 1m/s の場合に、 $36 \times 5 \times 2 + 17 \times 3 \times 2 = 45.6$ Mbps を送信できると期待できる。このような制御は、アクセスポイントからの RSSI の 1~2 秒程度の移動平均が閾値を超えているかどうかの判定、ならびに閾値以上の RSSI の維持時間の判定によって実現できる。すなわち、アクセスポイントからのビーコンを受信したら、低いデータレート (18Mbps) でデータ転送を開始し、アクセスポイントからの RSSI の移動平均が閾値を超えたならば、高いデータレート (54Mbps) の使用を開始し、この RSSI の高い状態が 10 秒間 (アクセスポイント前後 10m に相当) 続いたら、低いレートの通信に切り替えるようにすればよい。

②複数ノードの連携

適切なレート制御を用いても、単一の観測ノードがアクセスポイント付近を移動中に転送可能なデータ量に対して、観測ノードが蓄積した未転送データ量が多ければ、それを転送しきることは出来ない。このような場合、マルチホップ通信を用いて、データ送信元の観測ノードとアクセスポイントとの接続可能時間を延長するか、複数の観測ノードを用いてアクセスポイント間の異なる区間の撮影およびデータ転送を分担することでデータの転送が可能となる。カメラ画像のビットレートが 4Mbps であるとする、アクセスポイント間距離を 100m とした場合にアクセスポイント間で生ずる映像データサイズは、約 50MB となる。このサイズは、IEEE802. 11a を用いたときに上述した方法で適切にレート制御ができた場合に転送可能な最大データ量 (45.6MB) を上回っている。

a) マルチホップ転送

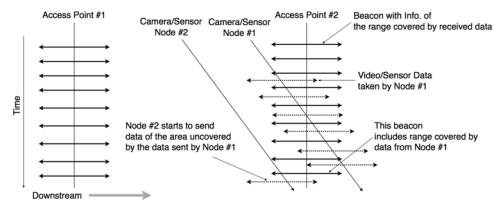


図5. 複数ノードによる観測区間の分担

マルチホップ転送によって観測ノードとアクセスポイントを接続する場合、観測ノードの他に一つないしは複数の中継専用、あるいは観測兼用のノードを利用する。この場合のデータ転送例を図 4 に示す。中継ノード同士が隠れ端末の関係にならないように、各ノードは複数の無線 LAN インタフェースをもち、1 ホップ毎に異なるチャネルを用いて通信するようにチャネルを割り当てる。観測ノードの前後のいずれにアクセスポイントがあっても接続可能とするため、およびアクセスポイントまでのホップ数最小限としてパケットロスの影響を少なくするため、観測ノードの前後に複数の中継ノードを配置するようにする。

観測ノードからアクセスポイントまでの経路制御は、以下のようにして行う。アクセスポイントは定期的に自身の ID を含むビーコンメッセージを送信する。中継ノードは、ビーコンメッセージを転送すると、それをアクセスポイントに近づく方向にある隣接ノードに転送する。このとき自身のノード ID を謝辞ビーコンメッセージに付与する。ノードの投入は隣接ノード間距離が十分長く、各ノードあたり各方向の隣接ノードが高々 1 台となるように計画的に行われると考えられる。したがって、各ノードは隣接ノードの ID を知っているから見なせるので、このビーコンメッセージの転送はユニキャストでも構わない。観測ノードは、ビーコンメッセージから得られたアクセスポイントまでの経路に従ってデータを転送する。なお、冗長性を増すためにノード間距離を詰める方法も考えられるが、この場合、近接ノードの同一チャネルの利用や過度の転送を招かないようなプロトコル上の工夫が必要である。

b) 複数ノードによる観測地域分担

個々の観測ノードのアクセスポイントへの接続時間が制限される問題に対処する方法として、複数の観測ノードがアクセスポイント間の異なる観測区域の撮影データを転送することで、ノードあたりのデータ転送時間を短縮する方法が考えられる。図 5 にこの方法の概要を示す。この方法では、個々の観測ノードが自身が転送すべき観測区間を知ることが出来るように、アクセスポイントが定期的にブロードキャストするビーコンに観測データ収集済の区間を付与するようにする。また、このビーコンは、現在アクセスポイントがある観測ノードから観測データを受信中かどうかを示す信号をもつ。

観測ノードはアクセスポイントからのビー

コンに従って、観測データの選択および送信の延期の判定をする。ビーコンから他の観測ノードがアクセスポイントにデータ送信中であることが分かれば、観測ノードは自身の観測ノードの送信を延期する。他の観測ノードが存在しないことが分かれば、自身が観測済のデータから、アクセスポイントが受信していない区間のデータを取り出して観測時のアクセスポイントからのRSSI、タイムスタンプ、および自身がそのアクセスポイントから初めてビーコンを受信したときのRSSIとタイムスタンプとともに送信する。アクセスポイントは、これらの情報から、届けられた観測データが得られた場所を推定し、観測データが送られてきていない区間を導出する。

(3) 下水管内浮流観測ノードの設計

下水管路内の段差をまたいだ移動も想定した浮流型のカメラ搭載観測ノードの実現を目指し、球形のカプセルにカメラ、ライト、バッテリーを格納した二重のカプセル構造の観測ノードを設計し、実験下水管での実験を通じ、実用に向けて必要となる撮影系の条件についての知見を得た。

① 観測ノードの構造

観測ノードは下水管路内を見上げるように全方位撮影するよう設計されている。観測ノードは回転可能な二重のカプセルの内部に、全方位カメラ、ライト、台座、バッテリーを配置した構造を持つ。外部カプセルの形状は球体であるため、水流が少ない状態の時、傾斜を外部カプセルのみを回転しながら移動することも可能である。カプセル内部からの光の反射の影響を軽減するため、全方位カメラを内部カプセルの最上部に設置している。内部カプセルが球体であると重心が上部に寄ってしまうためにカメラが傾きやすくなるため、内部カプセルの形状を半球状にし、重心が低くなるように工夫した。ライトの設置箇所は、内部での光の反射を防ぐために、ライト先端が内部カプセル上部を覆うフィルムに密着する位置とした。また、十分な光量を確保するために、4個のライトを使用した。ライト用のバッテリーは、重心を安定させるために内部カプセル下部に配置した。カプセルの内側、外側の直径はそれぞれ120mm、150mmであり、素材はポリ塩化ビニルである。カメラにはKodakのSP360全方位カメラを用いた。

② 実験結果

直径200mm、長さ6mの塩化ビニル管に水を流すことで下水管路内を模擬した実験用下水管試作した観測ノードを流しカメラで撮影後、管路内部の各位置に貼り付けした付せん位置を、明確に視認できるかどうかを確かめた。塩化ビニル管の傾斜は下水管路内を想定し1.5度とした。実験の結果、LED光源4個を搭載した場合、85%の付せんの位置を明確に視認することができた。一方でカプセルの継ぎ目や、カプセルへの水滴の付着、カプセル内部の機器の熱による曇りによる視認性の低下、

揺れによる垂直方向の回転が生じることが確認された。今後、カプセル素材の改良、垂直方向の回転を抑制する重りのバランスの工夫が必要であるとの知見を得た。

(4) 水平方向の回転補正方向の設計と実装

カプセル型の観測ノード内部から撮影された映像に生ずる水平方向の回転を補正する画像処理技術を設計し、実験によってその効果を確認した。設計した手法では、映像の各フレームを二値化し、隣接フレーム間で垂直方向の画素数ヒストグラムのマッチングを行うことで、隣接フレーム間の水平方向の角度ずれを推定する。

カメラが直進移動をしながら撮影した映像に、疑似的に1フレームあたり6度の回転を加えた映像を用いて補正の効果を検証したところ、推定か異端角度の平均誤差は0.19度となり、直進速度が早いほど誤差が大きくなることが確かめられた。補正後の映像を見た場合、若干の回転方向のずれが感じられるものの、回転が生じていることは感じられない程度に抑制されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Taiki Nagashima, Yudai Tanaka, and Susumu Ishihara, "Measurement of wireless LAN characteristics in sewer pipes for sewer inspection systems using drifting wireless sensor nodes," IEICE Trans. Communications, Sep. 2016. (Accepted)

[学会発表] (計 12 件)

1. 前田拓磨, 林友貴, 澤野弘明, 石原進, "下水管路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(DICOM02015)シンポジウム, (2016/7/6-8, 三重県鳥羽市鳥羽シーサイドホテル) [採択済].
2. 石原進, 長島大貴, 田中悠大, 林友貴, 前田拓磨, 澤野弘明, "下水管路検査のための浮流型ネットワークカメラシステムの開発," 電子情報通信学会技術研究報告, 知的環境とセンサネットワーク研究会, Vol. 115, No. 467, ASN2015-106, pp. 123-128 (2016. 03. 01, 東京理科大学, 東京都新宿区).
3. 田中悠大, 長島大貴, 石原進, "浮流観測ノードを用いた下水管内映像無線伝送システムのための通信路状態予測による送信レート制御手法の設計," 電子情報通信学会技術研究報告, 知的環境とセンサネットワーク研究会, Vol. 115, No. 437, ASN2015-95, pp. 93-98 (2016. 01. 29, 箱根湯本温泉の旅館 ホテルおかだ, 神奈川県足柄下郡箱根町).

4. 林友貴, 前田拓磨, 澤野弘明, 石原進, “浮流式全方位カメラを用いた下水管路内調査のための水平方向回転 角度推定手法の基礎検討”, 電気系学会東海支部連合大会, Po1-46 (2015. 09. 28, 名古屋工業大学, 愛知県名古屋市).
5. 前田拓磨, 林友貴, 澤野弘明, 石原進, “下水管路内検査のための浮流式全方位カメラシステムの提案と撮影 結果に対するの考察”, 電気系学会東海支部連合大会, Po1-47 (2015. 09. 28, 名古屋工業大学, 愛知県名古屋市).
6. Taiki Nagashima, Yudai Tanaka, Susumu Ishihara, Measurement of wireless communication characteristics in sewer pipes for sewer inspection systems using multiple wireless sensor nodes, in proc. IEEE 26th annual international symposium on personal indoor, and mobile radio communications (IEEE PIMRC'15), pp. 2245-2250 (2015/9/2, Hong Kong, China).
7. 田中悠大, 長嶋大貴, 石原進: 浮流観測ノードを用いた下水管内伝送検査のための基本システム的设计, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM02015)シンポジウム, pp. 533-540 (2015/7/8, ホテル安比グラウンド, 岩手県八幡平市)
8. 田中悠大, 長嶋大貴, 石原進, 浮流観測ノードを用いた下水管内映像無線伝送システムの試作, 情報処理学会全国大会, 6T-01 (2015/3/19, 京都大学, 京都市)
9. 長嶋大貴, 田中悠大, 石原進, 複数の無線ノードを用いた下水管内検査システムのための下水管内無線伝送品質の測定 ~920MHz 帯と 5GHz 帯, 電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会, 電子情報通信学会技術研究報告, ASN2014-136, (2015. 01. 27, ホテルむさし, 和歌山県西牟婁郡白浜町)
10. 石原進: [依頼講演]下水管検査のための流れるセンサネットワーク, 電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会, ASN2014-74, pp. 179-183 (2014/8/1, 京都テルサ, 京都市)
11. 長嶋大貴, 石原進: 複数の浮流無線センサノードを用いた下水管内検査システムのための下水管内無線リンク品質の調査, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル DICOM02014 シンポジウム, pp. 815-822 (2014/7/9, ホテル泉慶, 新潟県新発田市).
12. 長嶋大貴, 石原進: [ポスター講演]浮流無線センサノード群による下水管検査システム設計のための下水管内無線 LAN 伝送品質の測定, 電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会, ASN2014-16, pp. 53-56 (2014/5/29, 東

京大学先端科学技術研究センター, 東京都目黒区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原 進 (ISHIHARA, Susumu)

静岡大学工学部・准教授

研究者番号: 10313925

(2) 研究分担者

澤野 弘明 (SAWANO, Hiroaki)

愛知工業大学情報科学部・准教授

研究者番号: 10609431