

## 複数の無線自走ロボットを用いた小口径下水管検査のための陣形制御手法の設計と実装

メタデータ	言語: ja 出版者: 情報処理学会 公開日: 2023-10-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 近本, 祐介, Pham V., Thanh, 石原, 進 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10297/0002000057">http://hdl.handle.net/10297/0002000057</a>

# 複数の無線自走ロボットを用いた 小口径下水管検査のための陣形制御手法の設計と実装

近本 祐介<sup>†1</sup> Pham V. Thanh<sup>†1</sup> 石原 進<sup>†1</sup>

**概要：**国内では下水管の老朽化が深刻化し、全国的に下水管の検査や修復作業が必要となっている。しかしながら、その時間的、人的コストが作業実施の障壁となっている。筆者らは、既存の下水管検査手法よりも検査の短時間化や人的コストの削減、対障害物性の向上を目指し、小口径下水管を対象として複数の無線ロボット (UAV や UGV) を用いた管渠内部の検査システムの開発を進めている。このシステムでは、複数の無線ロボットを下水管内部に配置して無線マルチホップネットワークを構成し、通信接続性を維持するよう中継用の無線ロボットの位置を自動で調整しながら、1) 先頭を移動するカメラを搭載した無線ロボットへの制御コマンドの送信、および 2) 後続のロボット群を中継した映像のストリーミングを行う。本稿では、同システムの設計・実装と動作検証について報告する。

## Design and implementation of a multi-robot formation control method for small-diameter sewer pipe inspection using multiple wireless self-propelled robots

### 1. はじめに

現在、国内の下水管の総延長 48 万 km のうち 40%以上が耐用年数である 30 年を超えており、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 [1]。このため、老朽化下水管の早急な検査と危険箇所の補修・交換が必要とされている。既存の下水管内部の検査手法としてはファイバースコープ [2]、有線自走ロボット [3] を用いたものがあるが、これらの手法は機器・作業コストが高く、管内部の水深や堆積した土砂を原因とした検査範囲の制約が大きい。また、筆者らは機器コストの低い浮流カメラ [4] を用いた下水管検査システムの開発を進めているが、管内の水量の低下、管内を堆積している土砂によって浮流カメラが管内部を流れず検査できなくなるという課題がある。そこで筆者らは、浮流カメラではなく図 1 に示すような自走式の無線制御の小型 UV(Unmanned Vehicle) を複数使用した検査システムを提案している [5], [6]。

提案する検査手法の概略は以下の通りである。まず調査したい下水管付近のマンホールから複数の小型 UV (Un-

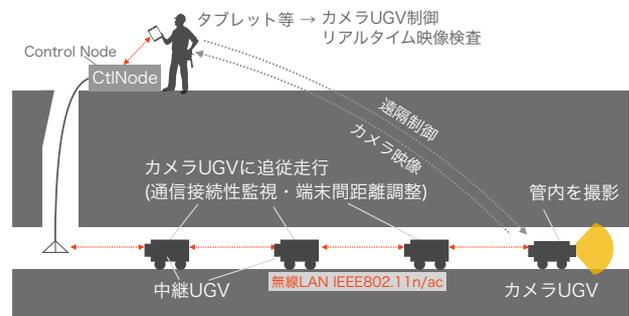


図 1 複数の UV を用いた下水管検査

manned Vehicle) を投入し下水管内部に配置する。投入口に設置した制御ノード (CtlNode) とこれらの UV 同士は無線 LAN によるマルチホップネットワークを構成し、通信接続性を失わないよう自律的に端末間距離を常時調整する。このネットワークを介して先頭を走行するカメラを搭載した UV (以後カメラ UV と呼ぶ) は、撮影映像を中継 UV (CtlNode とカメラ UV の間にある UV) を介して CtlNode へストリーミング送信する。検査員は CtlNode に接続したタブレット等からカメラ UV を遠隔操作し、リアルタイムに管内部の状態を確認するほかデータを保存する。この手法は、UV の配置後作業員が CtlNode に接続された端末を介して UV を操作し、閲覧したい箇所を検査で

<sup>†1</sup> 現在、静岡大学  
Presently with Shizuoka University

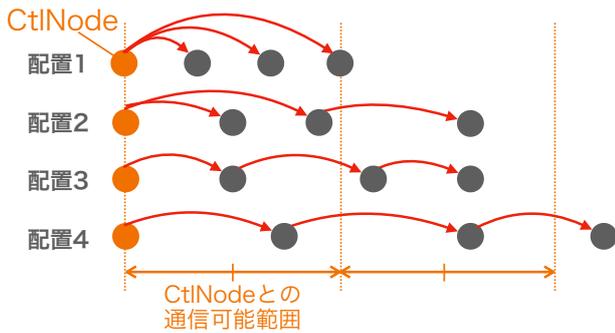


図 2 CtlNode から各 UV へのパケットの送信経路例

きるので作業コストが低く安全である。また、UV は管内部に堆積した土砂や水の有無の影響を受けにくいので長距離の検査が期待できる。

このシステムの実現のためには、UV の撮影映像データ並びに先頭のカメラ UV の遠隔操作に関する制御信号を下水管内部において無線 LAN によって転送可能でなければならない。長島らは、これまでに  $\phi 200\text{-}250\text{ mm}$  の地下下水管での  $2.4\text{GHz} \cdot 5\text{GHz}$  IEEE802.11 無線 LAN (IEEE802.15.4, 並びに  $920\text{MHz}$  帯 ARIB STD-T108) での通信性能の評価を行い、 $5\text{-}10\text{ m}$  程の通信可能範囲が確保できることを確認している [7]。先頭のカメラ UV からタブレット端末への安定した映像ストリーミングを維持するためには、各 UV は隣接 UV との間隔をこの通信可能範囲に収めるよう陣形制御をする必要がある。つまり UV 間の距離が最大でも約  $5\text{ m}$  以内になるように地上の端末からの遠隔操作のための制御信号を用いて陣形制御しなければならない。本稿では、複数の UV の陣形制御手法を提案する。

以下 2 章では目標とする複数の UAV を用いた下水管検査とその課題について述べ、3 章では UV 群の制御手法として一様伸縮方式と一部伸縮方式の 2 つの方式を提案し両者を比較する。4 章では一部伸縮方式の隊列制御を実装したことについて述べ、5 章では実装した機能の動作を検証したことについて述べる。6 章で本論文をまとめる。

## 2. 目標とする複数の UV を用いた下水管検査

1 章で述べたように、下水管内部での無線 LAN の使用には通信可能範囲の制限があることから、1 台の UAV を使用して数  $10\text{ m}$  以上に及ぶ範囲の遠隔操作、常時接続の映像閲覧をすることは容易ではない。このため、中継 UAV を複数台用いてマルチホップネットワークを形成し、先頭のカメラ UAV の遠隔操作並びに常時接続の映像閲覧の可能となる範囲を拡大することが本研究での目標となる。この目標を達成するためには、マルチホップ通信を保つような i) 各 UV の位置制御と、ii) 制御メッセージと映像データを確実に送信するための送信制御の両面について検討が必要である。後者については、堤ら [8] が提案をしている。本稿では前者について取り組んだ。

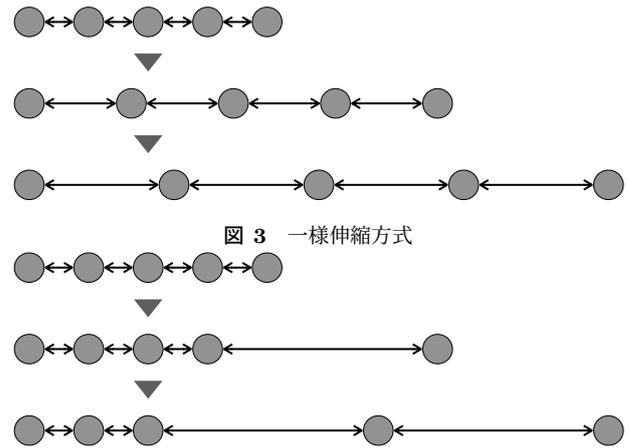


図 3 一様伸縮方式

図 4 一部伸縮方式

### 2.1 複数の UV の配置における課題

複数の UV の位置を制御する際には、CtlNode と各 UV 間でパケットが送信できるよう常に接続性を維持する必要がある。しかし、管内では通信可能範囲が限られているので、UV の移動により UV 間の接続性が変化すると、ネットワークのトポロジが変化する。これに応じてパケットの配送経路を動的に更新する必要がある。図 2 に 4 種の UV 配置における CtlNode から各 UV へのパケットの送信例を示す。配置 1 では、全ての UV が CtlNode との通信可能範囲に入っているため、各 UV へ 1 ホップでパケットを送信可能である。一方で配置 2,3,4 のように一部の UV が CtlNode との通信可能範囲を出ると、宛先によっては複数の UV を経由しなければパケットが到達しない。よって UV 間の無線リンクの接続性を確認し、その変化に応じてパケットの配送経路を適切に更新する必要がある。先頭のカメラ UV の位置が同じであってもその他の UV の位置には様々な配置があり得るが、現実的なものとして本研究では一部伸縮の配置と一様伸縮の配置 2 つについての隊形制御方式について検討した。以下の議論では各 UV は隣接 UV との距離を測るセンサを持つと仮定する。

## 3. 複数の UV を用いた隊列制御方式の検討

本章では一様伸縮方式と一部伸縮方式の 2 つの UV 群の制御手法について述べ、これらの方式をパケットの配送経路の更新頻度の観点で比較する。

### 3.1 一様伸縮方式

一様伸縮方式では、図 3 のように、UV 群が一様に伸縮することで、最も右側のノード (カメラ UV) の位置を調整する。図 7 に一様伸縮による動作例を示す。まず、複数の UV を衝突回避できる程度の最短間隔  $d_{\min}$  を維持した状態で下水管内部に配置する。全ての UV は定期的に隣接する CtlNode 側の UV との距離  $d$  を測距し、隣の UV との飛行間隔が  $d = d_{\min}$  となるように自律制御を行う。カメ

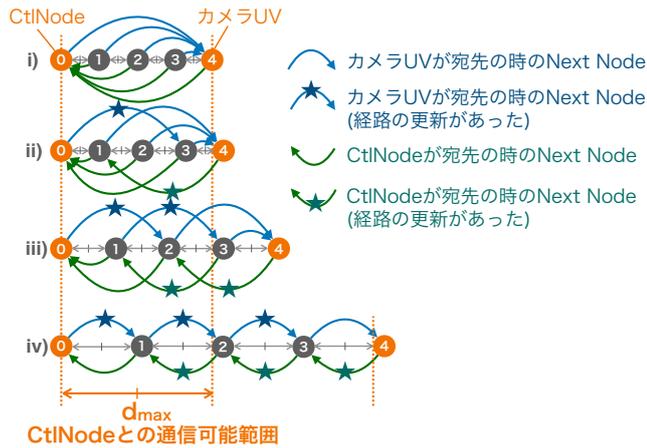


図 5 一様に伸ばした時の経路の更新の様子

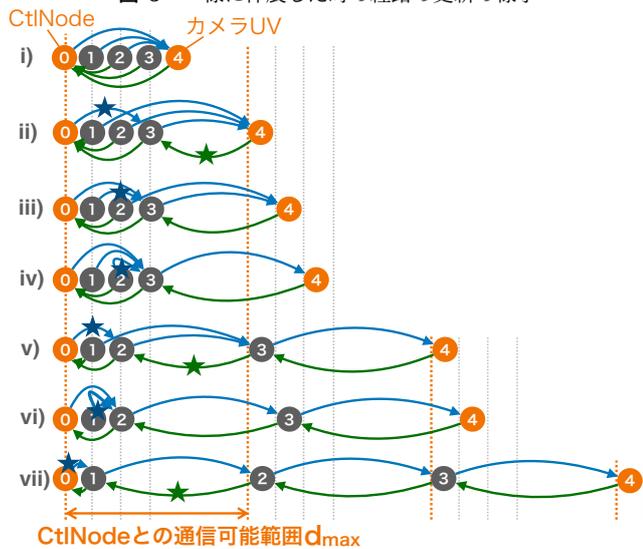


図 6 一部伸ばした時の経路の更新の様子

ラ UV を移動させる際には、間隔  $d$  を変更するメッセージを含んだ制御信号を全ての UV に向けて CtlNode からマルチホップネットワークを介してブロードキャストする。この制御信号を受信した UV は信号に含まれる新しい間隔となるように自律制御を行う。

### 3.2 一部伸縮方式

一部伸縮方式は、図 4 のように右側の UV から順番に間隔を広げていくことで、最も右側のノード（カメラ UV）の位置を調整する。図 8 に一部伸縮の制御の例を示す。この方式では 1 台の CtlNode 近くの UV のみに対して位置変更を指示し、間接的にカメラ UV の位置を操作する。一部伸縮方式の例を図 8 に示す。この図では CtlNode の最も近くで走行しているノードを SN(Stay Node)、それ以外を MN(Moving Node) と呼ぶ。また、MN の中でも SN に最も近いノードを TMN(Tail Moving Node) と呼び、先頭を走行するカメラ UV を HMN(Head Moving Node) と呼ぶ。各 UV は隣接する CtlNode 側の UV との距離  $d$  を定期的に測定し、この値をもとに以下に述べる隊列制御をする。

- SN の制御

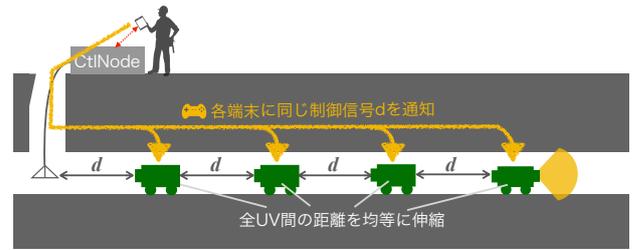


図 7 一様伸縮方式に基づく UV 群の制御

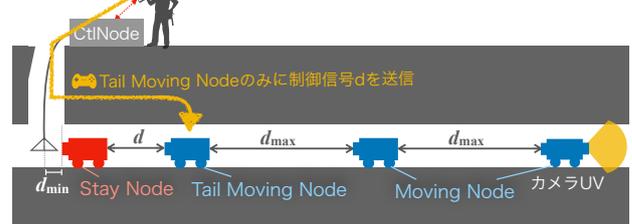


図 8 一部伸縮方式に基づく UV 群の制御

- $d = d_{min}$  となるよう間隔を調整する
- TMN の制御
  - 制御信号を直接 CtlNode から受信したのち  $d_{min} < d < d_{max}$  となる範囲で移動する。ここで、 $d_{max}$  は UV 間で制御信号の送信並びに映像転送が可能な最長距離である。
  - $d \leq d_{min}$  となると、1 つ右側を走行する MN を TMN へ切り替える制御信号を CtlNode へ送る。その後自身は SN へ切り替わる。
  - $d \geq d_{max}$  となると、1 つ左側を走行する SN を TMN へ切り替える制御信号を CtlNode へ送信する。その後、自身は MN へ切り替わる。
- その他の MN の制御
  - $d = d_{max}$  となるように間隔を調整する。

### 3.3 両方式の比較

#### 一様伸縮方式でのパケット配送経路の変化

図 5 に 4 台の UV が CtlNode との通信可能範囲にいる配置から一様伸縮方式に基づいて伸ばしたときの UV 群の配置とパケット配送経路の変化を示す。この図では、初期配置以外、CtlNode とカメラ UV の両方を宛先としたパケット配送経路の更新があった時のみに絞って UV 群の配置を示している。また、図ではカメラ UV を宛先とした時の各端末の次の送信先を青色の矢印、CtlNode を宛先とした時の各端末の次の送信先を緑色で示す。また、経路の変更が直前にあった場合には矢印に星印を加えている。図 5 において UV4 が CtlNode との通信可能範囲を超えて遠方へ移動すると、ノード 0 (=CtlNode) からノード 4 への経路における次ホップ 4 へのリンクの接続性が失われる。このため、ノード 0 は次ホップをノード 1-3 のいずれかに更新する必要がある。(ここではノード 0 は次ホップを 3 に更新するものとする) また、ノード 4 も同様にノード 0 との接

続性を失うので、宛先ノード 0 に対する次ホップを更新する必要がある。

一様伸縮の基づく UV 群の伸展では、各ノード間の距離が通信可能範囲を超えるたびに、各ノードで経路の更新が必要となる。例えば、ノード 2 が CtlNode との通信可能範囲外に出て両者間のリンクが切断されるとき、ノード 1-3 間、ノード 2-4 間のリンクも同時に切断される。これにより CtlNode とカメラ UV の両方を宛先として、同時に 6 箇所経路更新処理が生じてしまう。経路の更新を、リンクの切断検出を契機として行う場合、リンク切断の検出から新しい経路の確定まで、パケットの配送が途絶えることになる。経路の更新を各ノードの位置に基づいて CtlNode から指示したり、各ノードが自律的に行う方法も考えられるが、多くのノードで同時に処理を行う必要があり処理が煩雑である。

#### 一部伸縮方式でのパケット配送経路の変化

図 6 に、一部伸縮方式に基づいて伸展したときの UV 群の配置と経路の変化を示す。一部伸縮方式では、UV の移動に伴うリンクの接続性変化が生じるのは、CtlNode との距離を変化させているノードが持つ経路、およびそのノードを次ホップにしている経路のみとなる。一様伸縮方式に基づく UV 群の伸展と異なり、両端を宛先とした経路が一度に複数の端末で生じることはない。また、CtlNode 以外のノード間の距離が通信可能範囲を超えたとしても、その時に生じる経路変更はその時点での CtlNode とカメラ UV 間でのパケットの配送に影響はない経路である。従って、UV の制御メッセージの配送と映像ストリーミングへの影響は生じない。以上の議論より、一様伸縮方式よりも一部伸縮方式で UV 群を制御する方が、両端を宛先としたパケットの配送経路が同時に変更されてしまうことを防げるという優位性がある。

## 4. 一部伸縮方式の実装

本章では 3.2 節で述べた一部伸縮の方式による隊列制御を実装したことについて述べる。

### 4.1 UV の実装

一部伸縮方式による UV 群の隊列制御を実現するためには、CtlNode 側の隣接する UV 間の距離を測距し、特定の間隔を維持する機能が必要になる。この機能を有する UV のプロトタイプを実装した (図 9, 図 10)。各 UV は、Pololu 社製の自走ロボット Zumo[9] 上に Arduino Uno, IEEE 802.11n の無線 LAN の規格を有した Raspberry 3B, 40 m 程まで測距可能な GARMIN 社製の光学式測距モジュール (LIDAR-Lite V3HP)[10]、バッテリーを搭載している。カメラ UV についてはこれに加えて、カメラモジュールと管内部を照らすためのライトを搭載している。図 11 にこれらのモジュール同士の接続関係を示す。Arduino Uno

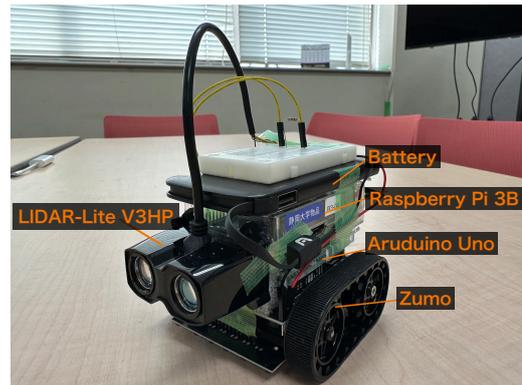


図 9 UV のプロトタイプ

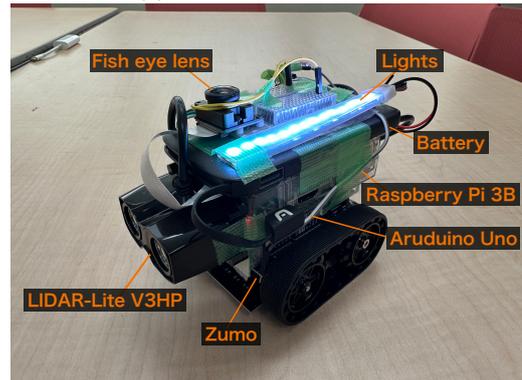


図 10 カメラ UV のプロトタイプ

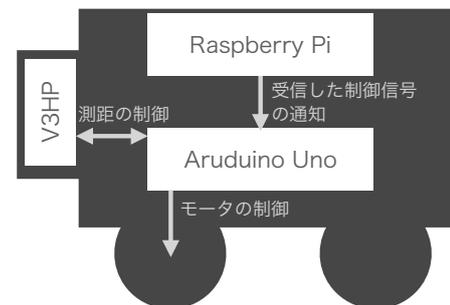


図 11 UV に搭載されたモジュールの接続関係図

は Zumo の前輪のモータの制御と、LIDAR-Lite モジュールの測距を制御する。

### 4.2 隣接 UV 間の距離の制御機能の実装

各 UV の Arduino Uno では、定期的に LIDAR-Lite モジュールによる測距を実施し、CtlNode 側の隣接 UV との距離をあらかじめ設定された距離  $d$  に保つようモータの出力値  $M$  を制御する。この距離を一定に保つための制御として P 制御を用いた。式 1 のように距離の測定値  $D$  と  $d$  の性大きくなるほど、より強くその差を  $D$  に近づけるように  $M$  の値を制御する。

$$M = -k(D - d) \quad (1)$$

ただし  $|-k(D - d)|$  がモータの最大出力値  $M_{\max}$  を超える場合はモータの出力の大きさを  $|M| = |M_{\max}|$  にする。比



図 12 CtlNode のプロトタイプ

例定数  $k$  は実験環境に応じて実験的に調整した。各 UV の Raspberry Pi は、他の UV から新しい端末間隔  $d'$  を通知する制御信号を受信すると、ただちに同 UV 上の Arduino Uno に対してこの通知を送信する (図 11)。この通知  $d'$  を受信した Arduino Uno は式 1 の  $d$  に  $d'$  を代入し、新しい間隔  $d'$  となるように P 制御を行う。

#### 4.3 一部伸縮の機能を有する制御信号の送信手法の実装

簡易的に一部伸縮の動作が可能となるよう各端末へ制御信号を送信する機能を実装した。ユーザは図 12 に示す CtlNode を直接操作し、カメラ UV の位置を上流から  $x$  m 地点へ移動要求するプログラムを実行する。すると CtlNode は、 $x$  を  $d_{\max}$  (端末同士の接続性が失われない最大の間隔) で割った商を  $m$ 、余りを  $r$  とし、以下に示すよう条件によって各端末  $i$  (ノード ID が  $i$  の端末) に対して異なる制御メッセージ  $d'$  を生成する。ただし  $d_{\min}$  は端末同士が衝突しない最小距離とする。

$$d' = \begin{cases} d_{\min} & (i < n - m) \\ r & (i = n - m) \\ d_{\max} & (i > n - m). \end{cases} \quad (2)$$

その後、CtlNode はこの制御情報を全て含んだ UDP パケットをブロードキャストする。このパケットの受信に成功した端末  $i$  は自身宛のメッセージを取り出して新しい端末間隔  $d'$  になるよう間隔を自律制御をする。この時、上流から Tail Moving Node (3.2 節参照) までのノードがビーコンパケットを受信することができていれば、ユーザが  $(x = d_{\max}, 2d_{\max}, \dots, nd_{\max}, nd_{\max} + r, nd_{\max}, \dots, 2d_{\max}, d_{\max}, 0)$  の順に移動要求プログラムを実行すると一部伸縮の陣形制御を実現できる。

#### 4.4 経路制御機能の実装

CtlNode と UV に対して簡易的なテーブル駆動型の経路制御を実装した。各端末に対して上流 (CtlNode 側) から順に昇順に Node ID を割り当てる。各端末は定期的に自身の Node ID を含めたビーコンパケットをブロードキャスト

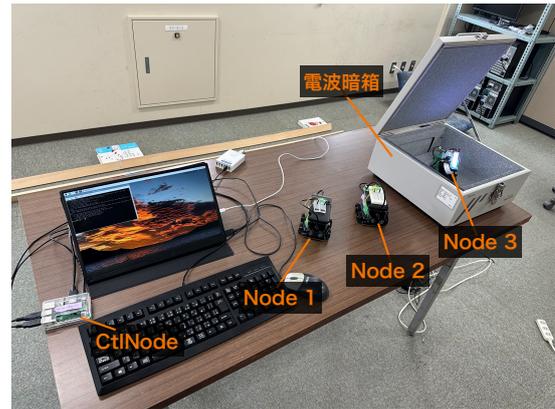


図 13 電波暗箱を使用した実験

トする。各端末のビーコン送信間隔が同一だと、他の端末のビーコンパケットの送信タイミングが連続的に重なり受信失敗を招くので、 $1 + \text{Rand}(-0.1, 0.1)$  秒の間隔でビーコンパケットをブロードキャストするようにした。ここで、 $\text{Rand}(a, b)$  は区間  $[a, b]$  の一様乱数である。

各端末は 1.1 秒間ビーコンパケットの受信待った後、受信できたビーコンパケットの送信元 ID を記録する。このとき記録された ID を以降 Alive IDs と呼ぶ。その後、各ノードを宛先として、経路を以下の規則で更新する。Alive IDs を宛先とする端末に対しては、パケットの送信は Direct (直接パケットを送りとどけるよう) に設定する。Alive IDs に含まれない宛先 ID に対しては、その ID が上流方向にあるノードのものであれば (自身の ID よりも小さければ)、Alive IDs に含まれる中で最も上流の端末 (最も Node ID が大きいもの) を経由するように設定する。同様に宛先が下流方向にあるノードのものであれば (自身の ID よりも大きければ) Alive IDs に含まれる中で最も下流の端末 (最も Node ID が小さいもの) を経由するように設定する。以上の経路制御を繰り返す。このアルゴリズムにより、各ノードは自身と接続性のあるノードのうち、宛先への物理的距離が最も小さいものを次ホップとするように経路を構築できる。

## 5. 動作検証

### 5.1 経路制御機能の動作検証

4.4 節で述べた経路制御の動作検証をした。以下の実験を実施する。図 13 のように CtlNode と、その他 3 台の UGV (Node) を用意する。この環境において、まず各 Node を起動し、4.4 節で述べた動的な経路制御プログラムを起動した。その後、以下の 3 パターンの環境下に Node を配置した。

**パターン 1** 暗箱にはどの Node も入れない

**パターン 2** Node3 のみを電波暗箱に入れる

**パターン 3** Node2 と 3 を電波暗箱に入れる

しばらく時間が経ったのち、CtlNode の経路情報を `ip route`

コマンドを実行して確認し、各 Node ID (1-3) に対する経路制御情報を調べた。

表 1 にそれぞれのパターンで実験をした後の CtlNode の経路制御の結果を示す。パターン 1 では各目的地に対して直接経路が設定されていることが確認できる。パターン 2, 3 それぞれについて、電波暗箱に入っていない端末を宛先とする経路は直接経路制御が設定されており、一方で電波暗箱に入っている端末を宛先とする経路制御については、電波暗箱に入っていないノードの中で ID が最も大きいノードを経由するように経路制御されていることが確認できた。

表 1 各パターンにおける実験結果

	目的地の ID	経由ノード ID
パターン 1	1	1
	2	2
	3	3
パターン 2	1	1
	2	2
	3	2
パターン 3	1	1
	2	1
	3	1

## 5.2 一部伸縮方式での陣形制御の動作検証

図 14 に示すように 3 台の UV(Node 1, Node 2, Node 3) を用い、屋内の環境で 4 章で述べた簡易的な一部伸縮の実装について動作を検証した。この実験環境では木製のレーンを 2 枚並行に並べ、その間に UV を配置することで UV は道を逸れずに前後にのみ移動できるようになっている。また、レーンの左端には本を敷いて段差を用意してある。Node 1 はこの段差との距離を光学式測距センサを用いて測ることが可能である。 $d_{\min} = 0.2\text{m}$ ,  $d_{\max} = 1\text{m}$  に設定し、CtlNode を操作して  $x = 1, 2, 3\text{m}$  の順に移動要求のコマンドを実行した。各コマンド実行してから队列の様子を確認し、10 秒ほど時間が経ったのち各 Node の左端 (段差の位置) からの距離を測定した。

各コマンド送信後 10 秒程度経過した後の队列の様子を図 15, 図 16, 図 17, に示す。また、各コマンドを入力してしばらく時間が経過した後の各端末の配置を図 18 に示す。 $x = 1$  を入力した後の Node の配置は、Node 2 と Node 3 との間隔が約 1 m,  $x = 2$  を入力した後、队列は Node 2 と Node 3 の間隔がほぼ一定のまま Node 1 と Node 3 の間隔が広がっていき、図 18 に示すように Node 1 と Node 2, Node 2 と Node 3 の位置が約 1 m 程開いた状態で停止した。また  $x = 3$  を入力した直後は Node 1 と Node 2, Node 2 と Node 3 の間隔がほぼ一定のまま段差と Node 1 の間隔が広がっていき、図に示すように段差と Node 1, Node 1

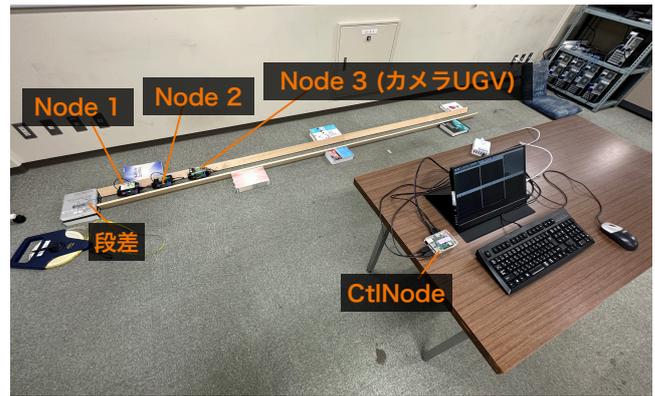


図 14 実験環境

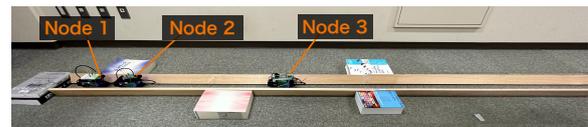


図 15  $x = 1$  を入力した後の队列

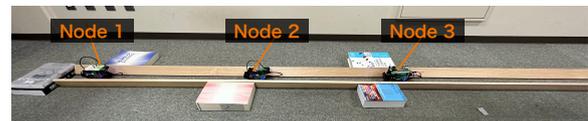


図 16  $x = 2$  を入力した後の队列

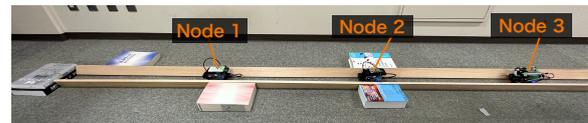


図 17  $x = 3$  を入力した後の队列

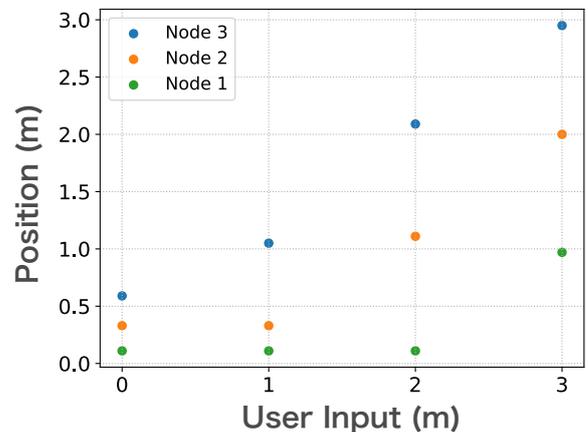


図 18 各コマンド入力後の端末の配置

と Node 2, Node 2 と Node 3 の間隔がそれぞれ 1 m 開いた状態で停止した。以上の結果から各コマンド入力後は端末が一部伸縮の配置になるように Node が移動していることが確認できた。

## 6. まとめ

複数の UV (Unmanned Vehicle) によるマルチホップ無線ビデオストリーミングを行う小口径下水管検査システム

のための UV の位置制御手法の設計・実装について述べた。設計・実装した一部伸縮方式による位置制御手法は、比較対象として述べた一様伸縮手法に比べて、ネットワークのトポロジ変化の発生機会を限定するため、経路情報の更新の頻度を抑制できる。従って確実な UV 制御とビデオストリーミングが可能になると期待される。

簡易的にこの方式を実装し、屋内の実験環境で検証したところ、期待通りの動作が確認できた。今後は、限定的であった一部伸縮の実装を拡張し、先頭のカメラ UV 任意の地点への移動・停止を可能とする機能を追加実装する予定である。また、地下に敷設された下水管にて、提案方式に基づく UV の移動と映像転送実験を行う予定としている。

**謝辞** 謝辞: 本研究は科学研究費補助金 21K18746 の助成により行われたものである。

pdf(2023/2/13 確認)

### 参考文献

- [1] 国土交通省, 下水道, “下水道の維持管理”. [http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd\\_sewerage\\_tk\\_000135.html](http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000135.html)(2023/2/13 確認)
- [2] 東芝テリー株式会社: 管内検査用カメラ, ハードケーブルカラーカメラシステム, HS3040 <https://www.toshiba-teli.co.jp/products/inspection/scope/hs3040.htm#bkm5> (2023/2/13 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 <https://www.qi-inc.com/products/snake-camera/> (2021/2/13 確認)
- [4] 石原進, 武居悠樹, 劉志, 前田琢磨, 澤野弘明, “下水管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, vol.DPS-172, no.4, pp.1-8, 2017.
- [5] 近本祐介, 堤悠喜, 石原進: 複数 UAV を用いた小口径下水管検査のための陣形制御手法の検討, 第 101 回モバイルコンピューティングと新社会システム・第 87 回高度交通システムとスマートコミュニティ合同研究発表会. (第 101 回 MBL・第 87 回 ITS 合同研究発表会), 研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), vol.2021-ITS-87, no.17, pp.1-5.
- [6] 堤悠喜, 近本祐介, 石原進: 複数移動無線端末を用いた下水管検査における端末制御と映像データ転送のためのマルチホップ通信手法の一検討, 第 101 回モバイルコンピューティングと新社会システム・第 87 回高度交通システムとスマートコミュニティ合同研究発表会. (第 101 回 MBL・第 87 回 ITS 合同研究発表会), 研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ (ITS), vol.2021-ITS-87, no.18, pp.1-3.
- [7] T. Nagashima, et al.: “Measurement of Wireless LAN Characteristics in Sewer Pipes for Sewer Inspection Systems Using Drifting Wireless Sensor Nodes,” IEICE Trans. Commun., vol.E99-B, no.9, 2016.
- [8] 堤悠喜, Pham Van Thanh, 石原進: 複数 UAV を用いた下水管検査システムのための映像データと UAV 制御情報の間欠的マルチホップ伝送プロトコルの評価, 第 105 回 MBL・第 91 回 ITS 合同研究発表会, vol.2022-MBL-105, no.23, pp.1-8.
- [9] Pololu: Pololu Robotics & Electronics, <https://www.pololu.com/docs/0J5>(2023/2/13 確認)
- [10] GARMIN: LIDAR-Lite V3HP Operation Manual and Technical Specifications, [https://static.garmin.com/pumac/LIDAR-Lite\\_v3HP\\_Instructions\\_EN](https://static.garmin.com/pumac/LIDAR-Lite_v3HP_Instructions_EN).