

# 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

近本 祐介<sup>†1</sup> 堤 悠喜<sup>†1</sup> 石原 進<sup>†1</sup>

**概要:** 現在下水管の老朽化が問題となっており、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。筆者らは下水管検査の短時間化や人的コストの削減を目指し、小口径下水管を対象として複数の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた管内の検査手法の開発を行なう。この手法は、複数の UAV によって下水管内部に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 UAV の位置を自動で調整しながら先頭を飛行するカメラ搭載 UAV のリアルタイムの操縦と映像転送を可能とするものである。この検査を実現するため、本稿では、管内を飛行する UAV の陣形制御手法を提案する。また下水管内部における UAV の陣形制御のために必要な UAV 間の距離測定技術について調査を行ったので報告する。

## A Study on Formation Control Method for Small Diameter Sewer Pipe Inspection Using Multiple UAVs

### 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]、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を開発していたが、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問題点があった。そこで本研究では、低コストかつ短時間、耐障害物性に優れた検査を可能とするため、図 1 のような複数の小型 UAV を用いた下水管検査システムを開発を目指す。

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 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を投入し下水管内部に配置す

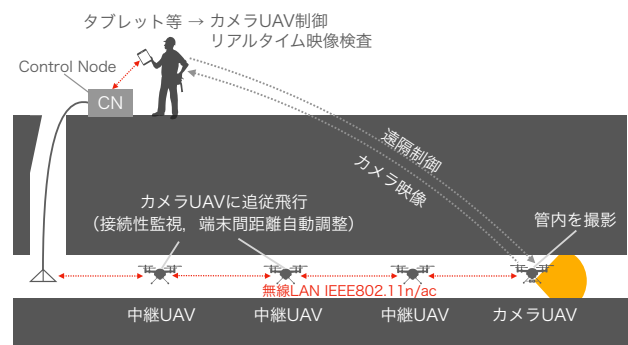


図 1 複数の UAV を用いた下水管検査

る。投入口に設置した制御ノード (CN) とこれらの UAV 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ておき、通信接続性を失わないよう自律的に端末間距離を常に調整する。このネットワークを介して先頭を飛行するカメラを搭載した UAV (以後カメラ UAV と呼ぶ) は、撮影映像を中継 UAV を介して常時 CN へストリーミング送信する。検査員は CN に接続したタブレット等からカメラ UAV を遠隔操作し、リアルタイムに管内部の撮影映像を検査する。この手法は、UAV の配置後作業員は CN に接続された端末を介して UAV を操作し、閲覧したい箇所を検査できるので、作業コストが低く安全である。また、UAV は管内部に堆積した土砂や水の有無の影響を受けな

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

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、UAV の撮影映像データ並びに先頭のカメラ UAV 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 [5]。先頭のカメラ UAV 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 UAV は飛行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 UAV 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 UAV を用いた陣形制御手法を提案する。この陣形制御に必要な各 UAV 同士の距離の測距可能距離・精度について議論する。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 章では筆者らの提案する複数 UAV を用いた陣形制御手法について述べる。4 章では下水管内部での UWB を用いた測距可能距離・精度に関する調査について述べ、5 章で本稿をまとめる。

## 2. 目標とする複数の UAV を用いた下水管検査とその課題

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に i) 通信品質および UAV での観測対象領域・及び今後の移動計画に応じた適切な UAV の陣形制御と、ii) UAV 陣形と通信品質に応じた適切な経路選択とデータ制御パケットの送信制御手法を開発する必要がある。後者については、堤ら [6] が提案をしている。本稿では前者の実現のための提案について述べる。

## 3. 複数 UAV を用いた陣形制御

### 3.1 陣形制御における課題

複数の UAV を用いた陣形制御について 2 つの課題がある。1 つ目に、制御信号の到達遅延によって UAV の陣形制御が遅延することが考えられる。地上の検査員の端末からのリアルタイムな遠隔制御要求に応じて、管内部の各 UAV に対して適切に移動のための制御信号を送信する。このとき下水管内部の端末に対して GNSS の使用が容易でないこ

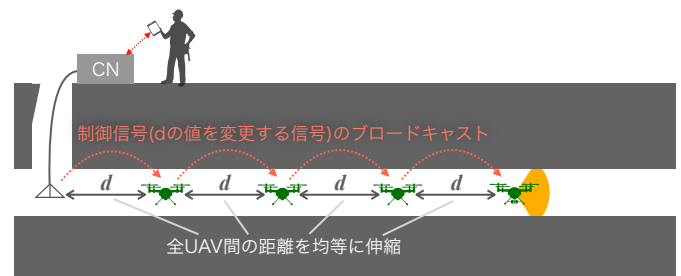


図 2 一様伸縮モデル

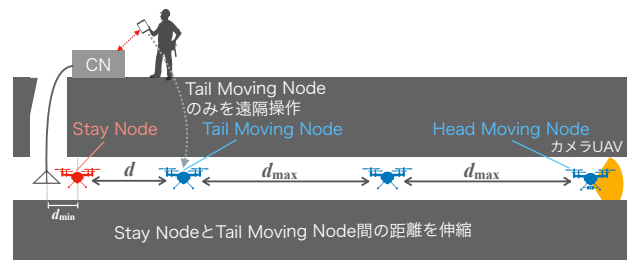


図 3 一部伸縮モデル

と、並びに管内部において無線 LAN を用いた通信可能範囲には制限があることから、この制御信号は検査員の端末から複数の UAV が形成するマルチホップネットワークを介し適切な UAV に向けて送信しなければならない。この制御信号の送信対象が増えると、制御信号の到達・到達確認のための時間的遅延が発生し、リアルタイムな陣形制御が困難になることが予想される。2 つ目に、カメラ UAV の撮影映像を地上の端末までストリーミング転送する際に効率的な経路選択をする必要がある。UAV の飛行間隔が小さく通信品質の良いリンクが複数存在した場合、映像データを隣の UAV へ転送するのではなく、そのリンクの中で最も CN へ近い UAV へ転送する方が映像データがマルチホップして生じる遅延を減らせる。

本章ではこれらの課題に着眼し、一様伸縮モデルと一部伸縮モデルを示し、両者を比較する。

### 一様伸縮モデル

図 2 に一様伸縮による陣形制御モデルの例を挙げる。まず、複数の UAV 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 UAV は定期的に隣接する CN 側の UAV との距離  $d$  を測距し、隣の UAV との飛行間隔が  $d = d_{\min}$  となるように自律制御を行う。地上の端末からカメラ UAV の移動を要求する際には、遠くに移動する場合は飛行間隔  $d$  を大きく、近くに移動する場合は飛行間隔  $d$  と小さく変更するメッセージを含んだ制御信号を全ての UAV に向けて CN 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 UAV は信号に含まれる新しい飛行間隔となるように自律制御を行う。これにより複数の UAV が一様に伸縮しながら先頭のカメラ UAV の位置を調整する。

## 一部伸縮モデル

このモデルは、1台のCN近くのUAVのみに対して遠隔制御を行い間接的にカメラUAVの位置を操作する。一部伸縮モデルの例を図3を用いて述べる。この図ではCNに最も近くを飛行しているノードをStay Node、それ以外をMoving Nodeと呼ぶ。また、Moving Nodeの中でもStay Nodeに最も近いノードをTail Moving Nodeと呼び、最も先頭を飛行するカメラUAVをHead Moving Nodeと呼ぶ。これらのUAVはすべて一様伸縮同様に定期的に隣接するAP側のUAVとの距離 $d$ を測定しこの値をもとに以下に述べる陣形制御をする。

- Stay Nodeの制御

$d = d_{\min}$  (UAV同士で接近しない程度に近づける最短間隔)となるように間隔を調整する

- Tail Moving Nodeの制御

地上の端末から $d$ を変更する制御信号を受け取り、制御信号を直接CNから受信したのち $d_{\min} < d < d_{\max}$ の範囲で移動する。 $(d_{\max})$ はUAV間で制御信号の送信並びに映像転送が可能な最大飛行間隔)

遠隔操作によって $d \leq d_{\min}$ となると、1つ右側を飛行するMoving NodeをTail Moving Nodeへ切り替える制御信号を送り、その後自身はStay Nodeへ切り替わる。

遠隔操作によって $d \geq d_{\max}$ となると、1つ左側を飛行するStay NodeをTail Moving Nodeへ切り替え、その後、自身はMoving Nodeへ切り替わる。

- その他のMoving Nodeの制御

$d = d_{\max}$ となるように間隔を調整する。

## 両者モデルの比較

一部伸縮モデルの利点について述べる。一様伸縮モデルは遠隔操作のための制御信号を全てのUAVに転送する必要があるのに対し、一部伸縮モデルは、CNの近くを飛行するUAVに1台に対してのみ制御信号を送信するので、陣形制御が制御信号到達の遅延による影響を受けにくいと考えられる。また、一様収縮モデルは $d$ の値が小さくなると、3.1節で述べたようにカメラUAVの撮影映像をストリーミング転送するためのより効率的な経路選択をしなければ、必要以上に映像データがマルチホップすることで生じる遅延が大きくなってしまふ。この近い距離で必要以上にマルチホップしながら映像ストリーミング転送してしまうことを一部収縮モデルは回避できる。

一部伸縮モデルの欠点として、Tail Moving NodeのStay Node、Moving Nodeへの切り替わり処理における遅延が

陣形制御への遅延を引き起こしてしまう可能性が挙げられる。Tail Moving NodeはCNを介して地上の端末から制御信号を受信するのでこの切り替わり制御を素早く実行できれば一部伸縮モデルを利用することが望ましいと考えられる。

## 4. 下水管内部でのUWBを用いた測距可能距離・精度の調査

本章では下水管内部における測距可能距離・精度の調査について議論する。3章で述べた通り、各UAVは隣接するUAVとの距離を測定した値を元に飛行間隔を調整する。安定した映像ストリーミングを維持するための最大飛行間隔は約5mであったことから、(1章参照)UAVに搭載するセンサの測距可能距離はこの間隔以上であることが望ましい。この条件を満足し得る測距方法としてUWB (IEEE802.15.4z)を用いた方法が考えられる。筆者らは大学に敷設された模擬下水管内部にてUWB (IEEE802.15.4z)の測距可能距離並びに精度を調べる実験を実施した。ここでは、この実験に基づき、提案システムでのUWBの応用可能性について議論する。

### 下水管内部でのUWBを用いた測距実験

大学に敷設された塩ビ製( $\phi 200$  mm)、鉄筋コンクリート製( $\phi 250$  mm)の模擬下水管にUWBインターフェースを搭載した端末2台を間隔を変えて設置し、測距を行った。以下に詳細な実験手順について述べる。

あらかじめ下水管には図4のようにハンドホールが設置されており、その上に土嚢が乗っている。まず下水管に取り付けられているハンドホールを開けて、インターフェースタグ(Apple AirTag)を貼り付けた木製の箱(図5)を開口から投入して真下に設置する。設置する際には下水管の中心にタグが位置するよう調整する。設置後ハンドホールの蓋を閉めて土嚢を上から被せる。投入地点から1m離れた地点のハンドホールを開けてUWBインターフェースを搭載した端末(図6)を投入し測距を行い、画面に表示される測距値を記録する。測距後は端末を取り出しハンドホールを閉めて蓋を閉じる。1mずつ間隔を増やしていき、測距値が取得できなくなるまで同様の操作を繰り返す。この実験を塩ビ製下水管の水の有(水深75 mm)無し、鉄筋コンクリート製の水の有(水深80 mm)無しそれぞれの測定環境で実施した。また、地上空間における測距と結果を比較するために1mおきに測定を行い測距の結果を記録した。

### 実験結果

表1はUWBを用いた模擬下水管内部での測距の結果をまとめたものである。この実験結果から塩化ビニル製模擬下水管( $\phi 200$  mm)では水の有無に限らず最大2m地点

表 1 下水管内部における UWB の測距性能評価

GroundTruth (m)	地上 (m)	φ200 mm 塩化ビニル製 (m)	塩化ビニル製 (水深 80 mm) (m)	φ250 mm 鉄筋コンクリート製 (m)	鉄筋コンクリート製 (水深 80 mm) (m)
1	0.8	0.7	0.8	1	0.8
2	1.8	1.7	1.8	2	1.8
3	2.8	N/A	N/A	2.9	2.8
4	3.8			4	3.8
5	4.8			4.9	N/A
6	5.8			5.9	
7	6.8			N/A	

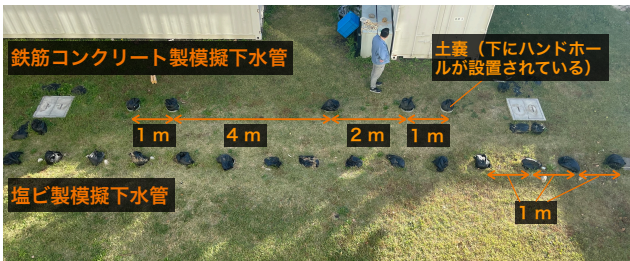


図 4 実験に使用した模擬下水管



図 5 木製の箱に貼り付けたタグ (AirTag Apple 社製)



図 6 ハンドホール内に投入した端末 (タグとの距離をリアルタイムに表示している)

まで、鉄筋コンクリート製模擬下水管 (φ250 mm) では、水の有無に限らず最大 4 m 地点までの測定値を取得できていることがわかる。また、測定精度については、最大で 30 cm の誤差が確認された。また、それぞれの測定環境ごとに誤差を調べると、誤差の変化は 10 cm 未満であった。さらに、測定間隔に限らず誤差が大きくなる様子は確認されなかった。

### 議論

実験結果より、口径 250 mm の鉄筋コンクリート下水管においては、1 章で述べた UAV の最大飛行間隔 (約 5 m) に若干及ばない 4 m の範囲までであれば測距可能であることが確認できる。この事実から UAV による測距を UAV の陣形制御に利用する場合、最大飛行間隔を 4 m 以内に設定することで、本研究で提案する一部伸縮モデルへの応用が可能となる。また、それぞれの個別の測定環境における誤差の変化が最大で 10 cm であり、測定間隔の大きさに応じて測定誤差が大きく変化の様子は確認されなかったことから、UAV の飛行間隔の変化による測距の乱れが 10 cm 以上の規模では生じにくいことが期待される。

### 5. まとめ

本稿では、複数の UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた小口径下水管検査を実現するため、複数の UAV を用いた陣形制御モデルの検討と、陣形制御に必要な端末間の測距に関する実験を行った。陣形制御モデルについては、提案した一部伸縮モデルと一様伸縮モデルを比較すると、一部伸縮モデルの方が制御信号の送信対象を減らして陣形制御の遅延を抑え、必要以上にマルチホップせず映像ストリーミングすることが可能であることを述べた。また、この陣形制御に用いる端末間の測距方法として UWB を用いた測距が利用可能であることを述べた。今後は、提案した陣形制御モデルへ UWB の測距を応用し実際に UAV を用いた陣形制御を実装していく予定である。

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。

### 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(2021/11/10 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> (2021/11/10 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/> (2021/11/10 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] 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.
  - [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, 情報処理学会, モバイルコンピューティングと新社会システム (MBL) 研究会 Work in Progress (WiP) (2021).
  - [7] 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, vol.1, pp79-80, (2019).