

# スマートメーター無線デバイスを用いた小型無人機の宛先家屋への自律移動経路制御法

上田清志 (日大工・情報)

## 1 まえがき

近年世界的にドローンなどの小型無人移動機の自動運転技術が注目され、物流や宅配の分野において人件費の削減や宅配の効率化等が期待されている。移動機の目視外飛行による宅配実施に向けた環境整備が進んでおり、さらなる運行管理システムや衝突回避技術の高度化・知能化が求められている。現在は、移動機に搭載されたカメラの映像をリアルタイム解析処理して現在位置周辺と着地点を認識し、膨大な地図情報とGPSにより現在位置、配達経路を把握する方法が研究開発されている。

移動機に搭載された限りある電力の消費が大きい画像解析や地図情報処理を用いず、宛先家屋の位置をより確実に特定するために全国の各家屋に設置されつつある“次世代電力量計”[1]スマートメーターの無線デバイスを用いる方式を提案する。

本無線デバイスは電力量情報を特定小電力無線(920MHz帯)マルチホップで電力会社へ転送するために設置されたものであり、全国に広がる安定したネットワークを構築できるノードである。平成28, 29, 30年度に大量導入され35年度までに全世帯導入完了予定である。この無線デバイスノード間に新たな無線マルチホップネットワークを構築し、それを移動機がたどることで安全に自律航行する経路ナビゲート方式を確立する(図1)。インターネット接続プロバイダとの契約・接続設定が困難な高齢者なども電気は使っておりスマートメーターがあるので全国に展開できると考える。宅配は宛先家屋との距離が測定できることに価値があり、GPSによる測位より実用性の高い測定といえる。

移動機の経路に適した人口集中地区上空を極力さけて安全な空域の経路が投射される無線マルチホップネットワークトポロジを構築する。小型移動機のネットワーク上の位置を把握することにより経路上を航行する方法、

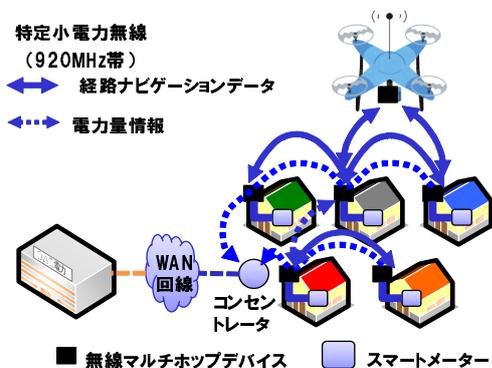


図1 無線マルチホップネットワークによる経路ナビゲーション

移動機の衝突回避や経路途中の異常発生に対応する迂回航行も可能なルーティング技術に基づく航路制御の方法を確立する。

全国に広がるスマートメーターネットワークを使った住民家屋の確実な位置情報の測定能力を利用すれば、東日本大震災のような激甚災害による電話やインターネット不通時にも、近くの家屋のスマートメーター無線デバイスを探し、自宅や市役所へ自分の居場所を通知し、救援をナビゲートするサービスなど、多様なサービスへの展開が期待できる。

## 2 提案方式

本稿では、移動機がネットワーク上にデータパケットが流れるように宅配を行うために、まず、安全性の高いスマートメーターネットワークの経路を構築するルーティングプロトコルを提案する。その上で、移動機がノードと通信し、ネットワーク上の位置検出や宅配先への移動制御に必要な情報を取得し航行制御する手法を提案する。

### 2.1 移動機の経路となるネットワークトポロジ

複数の無線デバイスの中継するネットワークトポロジ構築は従来から無線アドホックネットワーク(MANET)技術として研究されてきているが、AODV[2]などのリアクティブ型もOLSR[3]などのプロアクティブ型も発着端末間の最短経路を確立する。本研究では、移動機が安全に航行できる経路となるネットワークトポロジを構築する。より安全で優先される航行経路である住宅点在地区のノード(転送ノード)によるネットワーク(転送ネットワーク)と、人口集中地区内の一般ノードにより転送ネットワークへ最短で移動できるアクセスネットワークの2階層ネットワークモデルを想定する(図2)。

### 2.2 移動経路構築のためのルーティングプロトコル

小型無人移動機による宅配では、宅配先への経路が短時間で再利用されることが考えにくく、通信要求が発生する度に経路表を作成するリアクティブ型の代表例であるAODVをベースにルーティングプロトコルを検討する。ルート構築の流れを図3に示す。

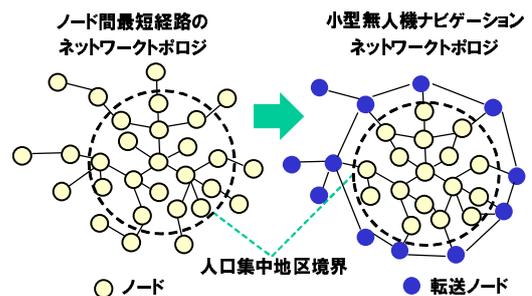


図2 移動機ナビゲーションネットワークトポロジ構築

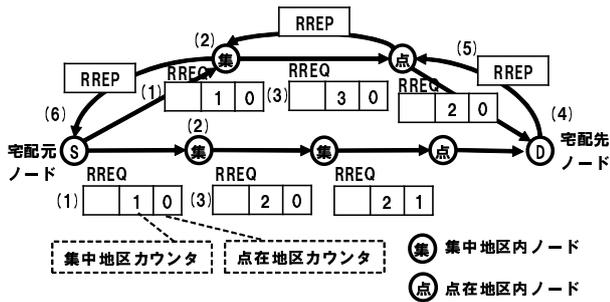


図3 ルート構築の流れ

まず全てのノードに自身が集中地区か点在地区かの情報を与えておく。AODVのRoute Request(RREQ)のヘッダに通過する地区をカウントする領域を追加する。ノードがRREQ信号を転送する際に、RREQ信号の通過するノードが所属する地区のカウンタが加算される。宅配先に届いたRREQ信号のヘッダには経路上の集中地区と点在地区の数が格納されている。宅配先のノードはRoute Reply(RREP)信号を集中地区のホップ数が最小な経路に送信する。これにより集中地区を避けた経路を確立することが可能となる。このとき、各ノードはノード間の距離を計算するためにRREQ, RREP受信時に無線デバイスが測定する伝搬損失値を経路表に格納する。

### 2.3 自律移動制御方式

航行経路に最適な物理的航行経路をマッピングし構築したノードとリンクによる仮想的なネットワークモデル上を、パケットフォワーディング技術に基づき移動機の航行経路をナビゲーションする。移動機は、無線マルチホップネットワークに接続し、隣接ノードからの信号受信時に無線デバイスが測定する伝搬損失値から移動機と隣接ノード間の距離把握を行う。移動機は、ネットワークから宅配先家屋ノードへのルーティング情報を取得し次ホップのノード上空へと移動する。他の移動機とのネットワーク上の距離(ホップ数)を把握することにより、航行経路の衝突を回避する。無線接続不安定などにより次ホップノードが検出できなくなった場合は、その地点から新たに宛先家屋ノードへのルートリクエストを行い、続く航行経路を確立する。

#### 2.3.1 条件定義

移動機の前後の進行方向をx軸、左右の進行方向をy軸、上下の移動方向をz軸と定義する。移動機は指定された一定の高度 $\Delta z$ で飛行すると仮定する。予め移動機に荷物の宅配元と宅配先のアドレスを与えるものとし、宅配元をS、宅配先をD、移動機はMとし、移動機がたどり着いたノードを現ノード、現ノードの一つ前のノードを前ノード、次に目指すノードを次ノードと呼ぶ。

#### 2.3.2 移動制御の流れ

移動機は現ノードから経路情報を取得し、現ノードと次ノードから位置検出に必要な情報を受信し、検出した位置情報を基に移動制御を行い移動する。位置検出と移動を繰り返し次ノードへ近づき、次ノード上空で方向転換をするために必要な情報を現ノード、次ノード、前

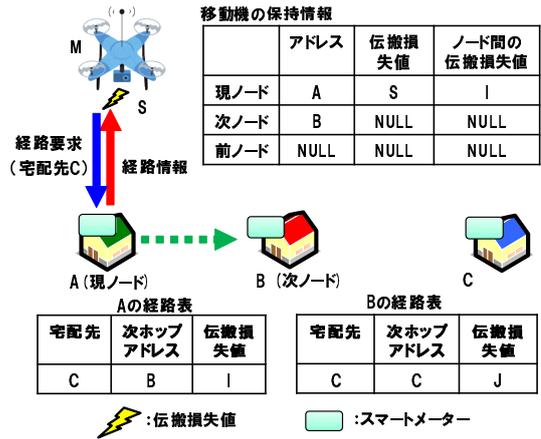


図4 経路の要求

ノードから受信し方向転換を行う。この処理を繰り返すことで移動機は宅配元からノードを中継し宅配先へ移動することが可能となる。

#### 2.3.3 使用する信号の提案

経路要求信号：移動機が現ノードへ次ノードのアドレスと現ノードと次ノード間の伝搬損失値を要求する信号

経路情報信号：経路要求信号の応答

宅配終了信号：経路要求信号の応答で宅配終了の旨を送信する信号

$\phi$ send信号：移動機が送信先のノードへ伝搬損失値を測定するための信号

$\phi$ reply信号： $\phi$ send信号の応答

#### 2.3.4 経路の要求

移動機が経路情報を取得するためには、現ノードの経路表の情報が必要となる。そのため移動機は現ノードに対して経路要求信号を送信する(図4)。信号を受信した現ノードは次ノードの情報を経路情報信号に格納し移動機に送信する。経路情報信号を受信した移動機は受信信号のヘッダから現ノードとの伝搬損失値と、データに格納された情報を保持する。これにより移動機は次ノードのアドレス、現ノードとの伝搬損失値、現ノードと次ノード間の伝搬損失値を得る。

#### 2.3.5 伝搬損失値の取得

伝搬損失値を取得するために、移動機は現ノードと次ノードへ $\phi$ send信号を送信し、各ノードから $\phi$ reply信号を受信する(図5)。移動機は $\phi$ reply信号受信時に測定した各ノードとの伝搬損失値を記録する。これにより、移動機と各ノードとの伝搬損失値を得る。

#### 2.3.6 伝搬損失値から距離の算出

移動機は無線デバイスがパケット受信時に測定した伝搬損失値を距離に変換する。フリスの伝達公式(1)より自由空間における伝搬損失を求めることが可能である。まずフリスの伝達公式より自由空間伝搬利得 $\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$ を求め、その逆数である $\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2$ が自由空間伝搬損失 $L_B$ である。

$$P_R = P_D A_R = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_T G_R P_T \quad (1)$$

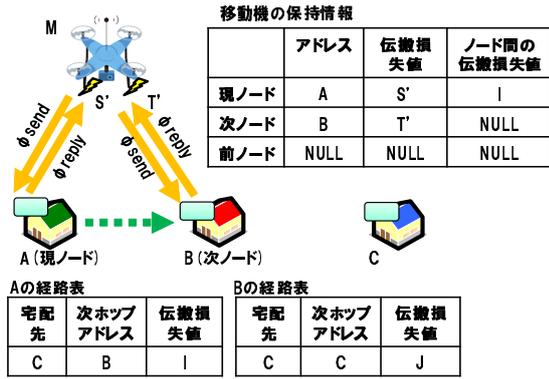


図5 伝搬損失値の取得

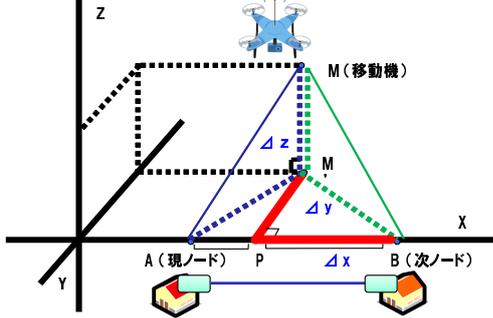


図6 位置の検出1

$P_R, P_T$  は電力,  $A_R, A_T$  はアンテナ実行面積,  $G_R, G_T$  はアンテナ絶対利得,  $P_D$  は電力密度,  $d$  は通信距離,  $\lambda$  は波長である. 変換後の式を距離  $d$  について解くことにより伝搬損失値から距離を求めることができる (2).

$$d = \frac{4\pi f}{c} 10\left(\frac{-20}{-L_B}\right) \quad (2)$$

$c$  は電波の速度,  $f$  は周波数である.

### 2.3.7 距離から位置の検出

移動機の高度  $\Delta z$ , 現ノードとの距離の辺  $AM$ , 次ノードとの距離の辺  $BM$  から三平方の定理を用い, 辺  $AM'$ ,  $BM'$  の距離を算出する (図6). 次にノード間の距離である辺  $AB$  と, 算出した辺  $AM'$ ,  $BM'$  から現在の移動機の位置を  $AB$  直線上に投射した際の  $B$  までの距離  $\Delta x$  と, 左右方向のずれ  $\Delta y$  を算出する (3) (図7).

$$\begin{cases} (c - \Delta x)^2 + \Delta y^2 = a^2 \\ \Delta x^2 + \Delta y^2 = b^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta x = \frac{-a^2 + b^2 + c^2}{2c} \quad (4)$$

$$\Delta y = \sqrt{b^2 - \Delta x^2} \quad (5)$$

求めた  $\Delta x$  と  $\Delta y$  は  $old\_x, old\_y$  として次回の計測時まで保持しておく.

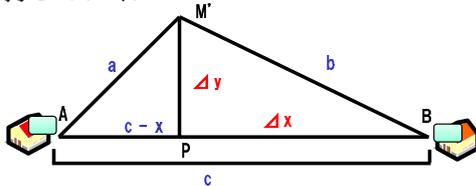


図7 位置の検出2

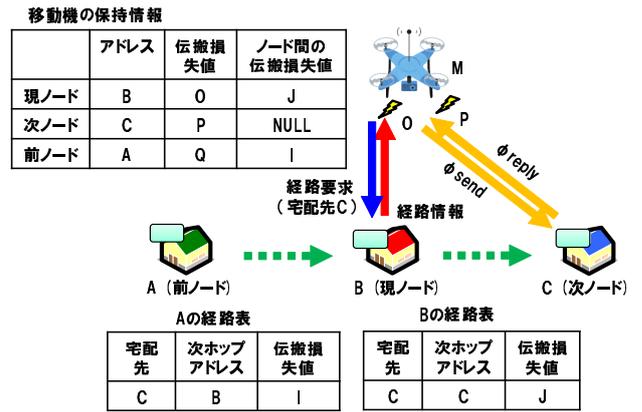


図8 現ノードの更新

### 2.3.8 移動制御

位置の検出後, 移動機は次ノードへ向け単位時間  $\Delta t$  移動し, 再び位置を検出する. この時,  $\Delta x$  と  $old\_x, \Delta y$  と  $old\_y$  をそれぞれ比較することで軌道修正を行い正しい方向へ移動する. 周期  $\Delta t$  で位置検出と移動制御を繰り返し次ノードに向かって移動する.

### 2.3.9 現ノードの更新

移動を続け  $\Delta x$  の値が0となると移動機が次ノードにたどり着いたことになるため, 現ノードを更新する. まず移動機は現ノードのアドレスを前ノードのアドレスとして保持し, 次ノードに向けて経路要求信号を送信して次ノードから経路情報信号を受信する (図8). この経路要求信号を送ったノードを現ノードとし, 経路情報信号から得た新しい次ノードを確定する. 以降, 再び伝搬損失値を取得し, 位置検出を行い移動する.

### 2.3.10 方向転換

現ノードの更新後に移動機は次ノードへ向けて方向転換を行う. この時移動機は前ノード, 現ノード, 次ノードから電波を受信することができる. まず, 移動機を現ノード上空から回転角の内角側へ移動させる. 内角側への移動は, まず  $y$  軸方向に次ノードとの伝搬損失値が小さくなる方向へ少し移動し, その後同じ距離だけ後方に移動することで実現する. その位置での各ノードとの距離と高度  $\Delta z$  から三平方の定理を用い, 辺  $AM'$ ,  $BM'$ ,  $CM'$  を求める (図9). その後ノード間の距離  $AB$  と算出した辺  $AM'$ ,  $BM'$  から余弦定理 (6) を用いることで  $\angle ABM'$  を求める事ができる (図10). 同様にしてノード間距離  $BC$  と算出した辺  $BM'$ ,  $CM'$  から  $\angle M'BC$  を求める.

$$\cos W = \frac{t^2 + u^2 - s^2}{2tu} \quad (6)$$

## 3 実装, 検証

### 3.1 実装準備

プログラムを作成する前に実際の空間で伝搬損失値から距離を求めるための式を実験から導く. Raspberry Pi 3 と無線デバイスを2台ずつ用意し, 移動機と家屋のスマートメーターとみなす. 移動機側の無線デバイスを家屋側から距離  $d$  を1mおきに離し, 家屋側は移動機側に

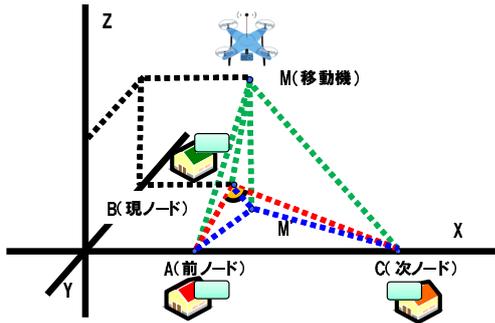


図9 方向転換

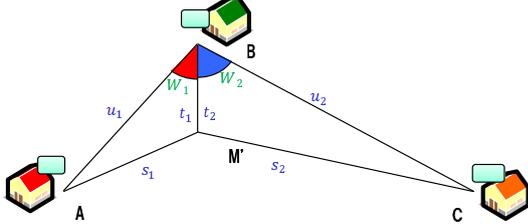


図10 余弦定理による角度の算出

向けて  $\phi$ reply 信号を送信する。移動機側が受信時に取得した伝搬損失値  $L_B$  を記録していく。

概ね、距離が大きくなるにつれ伝搬損失値は小さくなった (図11)。取得データから近似曲線を与え、式(7)を求めた。

$$d = e^{\left(\frac{L_B + 36.084}{-12.69}\right)} \quad (7)$$

実験で求めた式(7)を用い移動機の位置検出と移動制御を行うためのプログラムを作成、実装した。移動機側のプログラムでは信号の作成と送受信、位置測定、移動制御の処理を行い、移動制御の命令と計算結果を出力できるようにした。家屋側のプログラムには信号の作成と送受信を行う機能を実現した。

### 3.2 検証

Raspberry Pi 3 と無線デバイスを4セット準備し、1台を移動機、3台を家屋と見立て検証した。移動機とノードが指定した宛先へ向けて正しい信号を送受信できたか、条件ごとに正しい計算結果と移動制御命令の出力ができたか検証した。実際にプログラムを動作させ出力を確認する。また、表計算ソフトより計測結果を逆算し、出力結果に間違いがないかを確認した。今回は伝搬損失値の取得を行わず、予めノードに設定することで計算結果の

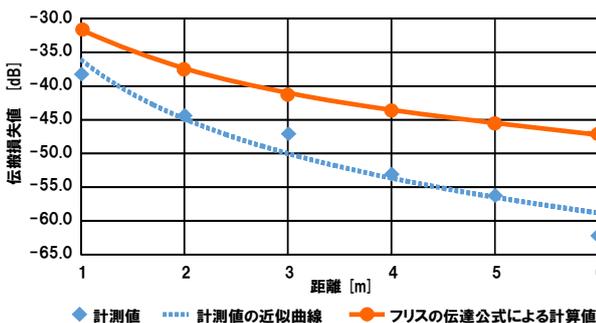


図11 伝搬損失値と距離の実験結果



図12 実装確認

| x           | y           |
|-------------|-------------|
| 5.018445148 | 0.398682882 |
| 4.44649965  | 0.813092288 |
| 3.441745226 | 2.092350862 |
| 3.502370162 | 0.591523978 |
| 2.870254819 | 2.82580601  |
| 3.287975622 | 5.895224693 |
| 2.737177129 | 0           |
| 1.827684114 | 0           |
| 1.519934322 | 0.591523978 |
| 0.575804834 | 0.813092288 |

|                       |
|-----------------------|
| x:5.018445 y:0.398683 |
| x:4.446500 y:0.813092 |
| x:3.441745 y:2.092351 |
| x:3.502370 y:0.591524 |
| x:2.870255 y:2.825806 |
| x:3.287976 y:5.895225 |
| x:2.737177 y:0.000000 |
| x:1.827684 y:0.000000 |
| x:1.519934 y:0.591524 |
| x:0.575805 y:0.813092 |

|                  |
|------------------|
| angle1:64.156751 |
| angle2:64.156751 |
| 右方向に51.686499度回転 |

表計算ソフトによる計算結果

出力結果

図13 比較結果

逆算を可能とする。

正しい信号が指定のノード間で送受信ができた (図12)。位置計算と方向転換の結果は、予測結果とほぼ同じ値を得ることができた (図13)。結果の異なる部分については有効数字による桁数の違いであるため問題ないといえる。このことから実装したプログラムは提案どおり動作したことを確認することができた。

### 4 まとめ

スマートメーターネットワークのノード間に新たな無線マルチホップネットワークを構築し、これを移動機がたどる経路ナビゲーションを提案した。

今後は、提案したシステムを実用化していく上で移動機が各ノードとの電波が届かない場合に高度を下げる、別の経路を探索する、電波が届く位置まで移動するなどの処理が必要である。また、離着陸や飛行中の安全性を確保することも課題である。今後、より本格的かつ総合的な研究を展開していく。

### 参考文献

- [1] 第15回スマートメーター制度検討会, "スマートメーターの導入促進に伴う課題と対応について," 経済産業省, Dec. 2014.
- [2] RFC3561, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing", IETF.
- [3] RFC3626, "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)", IETF.
- [4] 上田 清志, 柳川 恭平, 林 和希, 三好 匠, "スマートメーター無線デバイスを用いた小型無人機の宛先家屋への自律移動経路制御法," 信学技報, vol. 118, no. 88, NS2018-35, pp.43-48, Jun. 2018.
- [5] Kiyoshi Ueda, Takumi Miyoshi, "Autonomous Navigation Control of UAV using Wireless Smart Meter Devices," ICTF 2018, IEICE, July. 2018.