

モバイル端末ユーザにより構成される DTN システムへの マルチコプターノードの導入に関する研究

林 秀和 指導教員：奥田 隆史

1 はじめに

災害発生後に被災地内で情報伝達（インフラ復旧情報、安否情報など）をおこなうために、既存の通信インフラに依存しない情報伝達システムの構築が求められている [1]。そこでインフラに依存しないシステムとして、モバイル端末（スマートフォン、携帯電話など）を活用して遅延耐性ネットワーク（DTN: Delay Tolerant Network）[2] システムを構築することが考えられる。

モバイル端末ユーザによる DTN システムにおいて、情報を安定かつ高速に伝達するためには、システム内に十分なユーザが存在した上で、各ユーザが頻りに移動して情報の送受信をおこなう必要がある。しかし、ユーザ数が少ない場合や、ユーザの移動に偏りがある場合は、情報が十分に伝達されない現象が生じる。

そこで、本研究ではこのような DTN システムで中継ノードとして、マルチコプターを活用することで情報伝達の安定化・高速化を目指す。マルチコプターを利用する理由は柔軟な移動が可能であり、また安価であるからである [3]。本研究では、マルチコプターの移動方法が DTN システムへ与える影響を明らかにするために、想定する DTN システムをマルチエージェントとしてモデル化し、シミュレーションにより性能評価をおこなう。

2 想定する DTN システム

本研究では、被災地内にモバイル端末を所持した複数のユーザとマルチコプターが存在し、ユーザ間、あるいはユーザとマルチコプター間が Store Carry Forward(SCF) に基づきメッセージ転送をおこなう DTN システムを想定する（図 1 参照）。なお、通信インフラは損害を受けて通話やインターネット接続が困難・不可能であることを想定し、情報伝達には DTN のみを用いるものとする。

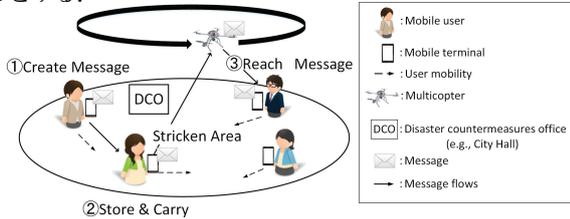


図 1 想定する DTN システム

想定する環境は 3 次元空間であり、ユーザは起伏のない地上に、マルチコプターは上空に存在するものとする。各ユーザは 1 台のモバイル端末を所持している。各モバイル端末はメッセージの送受信をおこなうための無線通信機能、ストレージを搭載している。全モバイル端末は同一性能であるとする。各ユーザの位置は歩行によって変化するものとする。ユーザは被災地内の別のユーザを宛先としたメッセージを生成し、メッセージは生成者のモバイル端末のストレージに蓄積される。

マルチコプターは一定の高度を維持しながら移動するものとする [3]。マルチコプターは市役所のような災害対策本部で管理されていると想定する。マルチコプターは無線通信機能、ストレージを搭載している。無線通信機能はユーザが所持するモバイル端末と同性能である。また、ストレージは十分なメッセージを蓄積可能とするために無限容量とする。なお、マルチコプターの飛行時間は通信によって低下しないものとする。

メッセージはユーザ、またはマルチコプターにより中継され、宛先へ転送される。メッセージを所持するノードは無線通信距離内のノードを探索する。そして無線通信距離内に自身を除くノードが存在する時、メッセージの送受信を行う。なお、災害時の人間の利他主義・相互扶助の心理を想定し、ユーザはモバイル

端末のバッテリー残量がある限り中継を拒否しないとする [4]。

3 DTN システムのモデル化

想定する DTN システムの環境として、図 2 に示す $O = (0, 0, 0)$ を原点とする 3 次元座標系を仮定し、3 次元空間 $\text{Env}[m^3](x_{\text{Env}}[m] \times y_{\text{Env}}[m] \times z_{\text{Env}}[m])$ を想定する。Env 内には、 N [人] のユーザと、 M [台] のマルチコプターが存在する。ここで、各ユーザをユーザエージェント $U_i (i = 1, \dots, N)$ 、各マルチコプターをマルチコプターエージェント $Mc_j (j = 1, \dots, M)$ と表現する。

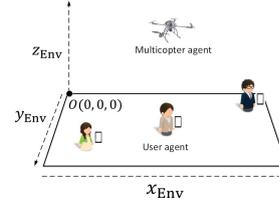


図 2 DTN システムの座標系

3.1 ユーザエージェント

ユーザ U_i は時刻 t において ① 現在地、② 移動、③ モバイル端末、④ メッセージ生成の属性を持つとする。

① 現在地: U_i の現在地を $U_i(t) = (x_i, y_i, 0)$ と表す。 U_i の時刻 0 の位置は、避難所外避難者が増加傾向であり避難者の拠点が自然発生することから Env 内で一様に決定されるものとした。

② 移動: U_i の移動は Random Waypoint を用いて表す。 U_i は目的地 $P_i(x_{i_{\text{dest}}}, y_{i_{\text{dest}}}, 0)$ へ速度 v_i で移動する。目的地 P_i に到着したとき、 U_i は時間 w_i 停止し、新しい目的地を決定し、再び移動する。行動目的を考慮し、目的地 P_i 、停止時間 w_i は一様に決定される。

③ モバイル端末: U_i のモバイル端末の無線通信範囲を cr と表す。これは、全ユーザが同一性能のモバイル端末を所持し、無線通信範囲が同一であるためである。

④ メッセージ生成: U_i は λ_i のポアソン分布に従い、環境内の自身を除くユーザ $U_k (i \neq k, 1 \leq k \leq N)$ を宛先とするメッセージを生成する。 U_k は一様に決定される。

3.2 マルチコプターエージェント

マルチコプター Mc_j は時刻 t において ① 現在地、② 移動、③ 搭載機能の属性を持つものとする。

① 現在地: Mc_j の現在地を $Mc_j(t) = (x_j, y_j, z_j)$ と表す。 Mc_j は高度 h_j を維持するため、 $Mc_j(t) = (x_j, y_j, h_j)$ となる。また、 $Mc_j(0) = (x_{\text{Env}}/2, y_{\text{Env}}/2, h_j)$ とした。

② 移動: Mc_j の移動モデルを表す (1)Lissajous Model, (2)Random Waypoint についてそれぞれ説明する。

(1) Lissajous Model(LM)

$Mc_j(t) = (x_j, y_j, h_j)$ の x_j, y_j は

$$\begin{aligned} x_j &= \frac{x_{\text{Env}}}{2} + A_{x_j} \cos(a_j \times \omega_{x_j}(t)), \\ y_j &= \frac{y_{\text{Env}}}{2} + A_{y_j} \cos(b_j \times \omega_{y_j}(t) + \delta_j) \end{aligned} \quad (1)$$

に従う。ここで、 A_{x_j} は x 軸方向における Mc_j の旋回半径であり、 A_{y_j} は y 軸方向における Mc_j の旋回半径である。 $a_j = 1, b_j = 1, 2$ であり、 $0 \leq \delta_j \leq \pi$ である。また、 $\omega_{x_j}(t) = \omega_{x_j}(t-1) + Mcv_j/A_{x_j}$ 、 $\omega_{y_j}(t) = \omega_{y_j}(t-1) + Mcv_j/A_{y_j}$ であり、 $\omega_{x_j}(0) = 0, \omega_{y_j}(0) = 0$ である。 Mcv_j は移動速度である。 a_j, b_j, δ_j の値により、 Mc_j の移動軌跡が円状、8 の字、直線などに従う。本研究では、移動軌跡が 8 の字に従う Type_E($a_j = 1, b_j = 2, \delta_j = \pi/2$)、円状に従う Type_C($a_j = 1, b_j = 1, \delta_j = \pi/2$)、直線に従う Type_L($a_j = 1, b_j = 1, \delta_j = 0$) を用いる。

(2) Random Waypoint(RW)

Mc_j は移動速度 Mcv_j でランダムに選択した地点 $McP_j(x_{j_{dest}}, y_{j_{dest}}, h_j)$ へ移動する。地点 McP_j は一様に決定される。地点 McP_j に到着したとき、 Mc_j は時間 Mcv_j 停止し、新しい地点を決定し、再び移動する。

③ 搭載機能：マルチコプターの有効通信範囲はモバイル端末と同様に cr である。しかし、マルチコプターは上空に存在しているため、地上に存在するユーザに対する有効通信範囲 cr_g は cr よりも狭い。本研究では、 cr_g を三平方の定理を用い、 $cr_g = \sqrt{cr^2 - h^2}$ とした。

3.3 エージェント間の通信

エージェントは自身のストレージにメッセージを蓄積しているとき、 $S_{Interval}$ [sec] に 1 度通信相手を探索する。有効通信範囲 cr 、 cr_g 内に自身を除くエージェントが存在するとき、通信相手を決定して通信をおこなう。

送信者エージェントは送受信レート MR [通(メッセージ数)/sec] に従い、メッセージを受信者エージェントへ送信する。ただし、エージェント間の距離が移動により有効通信範囲外となったとき、通信は中断されるものとする。エージェント間のメッセージ送受信が繰り返され、メッセージは空間 Env 内に伝播され、宛先まで伝送される。なお、中継転送技術は感染形中継転送方式に基づくものとする。

4 数値例

DTN システムの性能は環境内のユーザの密度や移動によって変化する。本節では、マルチコプターの移動性と空間 Env 内のユーザ数がシステムへ与える影響を評価する。そのため、我が国の平均的な人口密度 343 [人/ km^2] を基準に、人口密度が高い場合、低い場合におけるシステムの性能の違いを比較する。

空間 $Env = 1000 \times 1000 \times 50$ [m^3]、ユーザ数 $N = 86, 171, 343, 686$ [人]、ユーザの歩行速度 $v = 2$ [m/sec]、停止時間 $w = 15$ [min]~ 2 [hour] の一様分布、メッセージ生成率 $\lambda = 1/3600$ 、有効通信範囲 $cr = 70$ [m] とした。マルチコプター数 $M = 1$ [台]、マルチコプターの移動速度 $Mcv = 30$ [km/h]、高度 $h = 32$ [m][5]、旋回半径 $A_x, A_y = 438$ [m]、地上への有効通信範囲 $cr_g = 62$ [m] とした。探索間隔 $S_{Interval} = 120$ [sec]、メッセージ送受信レート $Mr = 3$ [per sec] とした。本研究ではシミュレーションプログラムの開発環境として、(株)構造化研究所の *artisoc* を用いた。マルチコプターの稼働時間は最大 1 時間 [6] であるため、シミュレーション時間を 1 時間とした。シミュレーションを 50 回実行し、その平均値と 95% 信頼区間を用いて性能評価をおこなう。

性能比較には 2 つの評価値：生成者のメッセージが宛先へ到着するまでの時間(情報伝送遅延時間)、生成されたメッセージの総数に対して宛先まで到着したメッセージ数の割合(情報伝送率)を用いる。情報伝送遅延時間を図 3 に、情報伝送率を図 4 にそれぞれ示す。

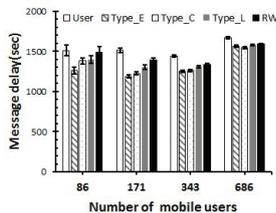


図 3 情報伝送遅延時間

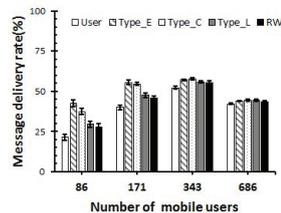


図 4 情報伝送率

図 3、図 4 から、ユーザ数 N が少ない場合ほど、マルチコプターの活用効果が大きいことがわかる。一方、環境内のユーザ数 N が多い場合はドローンの活用効果が小さい。これは環境内に中継ノードが十分に確保されているためだと考えられる。また、マルチコプターの移動モデルに着目すると、ユーザ数 N に関わらず特定の軌跡に従って移動する場合(LM)はランダムに移動する場合(RW)と比較して活用効果が大きいことがわかる。

次に、マルチコプターの各移動モデルを分析し、どの移動特徴がシステムの性能へ影響するのかを調べる。システムの性能差

が現れた一例として、ユーザ数 $N = 171$ [人]とした場合を分析する。ここで、分析には 4 つの項目：マルチコプターによって 1 度以上通信可能となった地上の領域に対してマルチコプターが各領域へ訪れた回数(カバー頻度)、1 人あたりのユーザがマルチコプターと接触した回数(接触頻度)、ユーザとマルチコプターの接触終了時から次の接触までの時間(接触間隔時間)、地上の総面積に対して、マルチコプターと通信可能となった地上面積の割合(カバー率)を用いる。

各移動モデルにおけるカバー頻度の相対度数、累積相対度数を図 5 に、接触頻度の累積分布関数を図 6 に、接触間隔時間、カバー率を表 1 にそれぞれ示す。

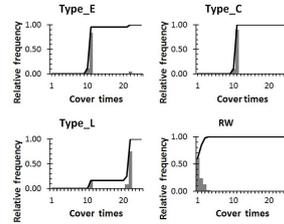


図 5 カバー頻度

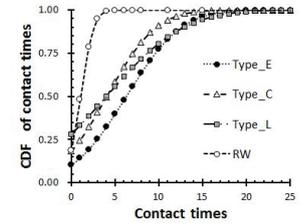


図 6 接触頻度

表 1 マルチコプターの移動モデル特徴分析

Motion Type	Inter-contact time(sec)		Cover rate	Delay(sec)	Delivery rate(%)
	Avg.	95%CI		Avg.	Avg.
Type.E	268.43	262.89 - 274.02	0.55	1189.14	55.56
Type.C	223.62	216.45 - 230.80	0.38	1224.36	54.62
Type.L	167.17	159.96 - 174.39	0.18	1306.44	47.68
RW	453.99	434.99 - 472.98	0.64	1391.52	45.67

図 5-6 と表 1 から、RW と比較して、LM は特定の軌跡に従って移動することでカバー頻度が高いためユーザと接触する確率が高く、接触間隔時間が短いことがわかる。つまり、マルチコプターが特定の軌跡に従い移動する場合、軌跡上が通信可能となる頻度が高いため接触確率も高く、通信性能の高いシステムとなる。更に、表 1 から、性能が良い Type.E, Type.C は Type.L と比較してカバー率が高いことがわかる。以上の結果から、DTN システムの性能を高めるマルチコプターの移動モデルの一つとして、カバー頻度を高めた上で、通信可能領域が広い移動モデルを検討することが示唆される。

5 おわりに

本稿では、モバイル端末ユーザにより構成される DTN システムで中継ノードとしてマルチコプターを活用したとき、システムの性能へどのような影響を与えるのかをシミュレーションにより検証し、考察した。

今後の課題として、ユーザの行動や心理を想定した上でユーザエージェントをモデル化し、マルチコプターの機能的側面を考慮した移動モデルをシミュレーションにより検証することがあげられる。また、実環境を想定し、伝搬損失を考慮した場合のシステムへの影響を検証することがあげられる。

なお、本研究は科研費(16K00430)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 京大・NTT リジリエンス共同研究グループ、『しなやかな社会への試練 東日本大震災を乗り越える』、日経 BP コンサルティング、2012。
- [2] 鶴正人ほか、『DTN 技術の現状と展望』、電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン、no. 16, pp. 57 - 68, 2011。
- [3] 井上公ほか、『自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術』、防災科学研究所研究報告、no. 81, pp. 61 - 98, 2014。
- [4] 阿部恒之、『今を生きる 東日本大震災から明日へ! 復興と再生への提言』、東北大学出版会、2012。
- [5] 国土交通省、『無人航空機(ドローン・ラジコン機等)の飛行ルール』、国土交通省、http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003.html、2017 年 1 月参照。
- [6] BusinessNewsline、『Yeair:連続 1 時間の飛行を可能にしたハイブリッドエンジン搭載マルチコプターを発表』、<http://business.newsln.jp/news/201505280130350000.html>、2017 年 1 月参照。