

津波避難訓練時の行動把握調査への UAV 活用に向けた検討

Applicability of Unmanned Aerial Vehicle to Tsunami Evacuation Behavior Monitoring

○奥村 与志弘¹・土肥 裕史²・今 恵史¹
Yoshihiro OKUMURA¹, Yuji DOHI² and Keiji KON¹

¹関西大学 社会安全学部

Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University

² (国研) 防災科学技術研究所 社会防災システム研究部門

Integrated Research on Disaster Risk Reduction Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

The role of unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has become more and more important to obtain temporal-spatial data of the tsunami evacuation drill participants' behaviors. The purpose of this research is to provide fundamental data to develop the multi-UAV monitoring method for tsunami evacuation drill, which could reduce the shooting interruption time caused by the short battery life. As a result, it was found that the shooting interruption time can be within 30 seconds by setting an UAV 30m above the shooting spot. Also, a video shot by the stacking UAV during its stacking has a blind area caused by another UAV below, and the blind area was found to be within a 10m radius.

Key Words : multi-UAV monitoring, tsunami evacuation drill, shooting interruption time

1. はじめに

巨大津波は発生頻度が低いため、効果的な津波避難対策を検討するために、実際の災害時の避難行動データに加え、避難訓練時の避難行動データも活用する方を模索すべきである。著者らは、映像に映るすべての人々の行動に関する時空間データを入手できるという無人航空機(UAV)の特徴に注目し、UAVを用いた避難行動調査手法を検討してきた¹⁾。同手法は、南あわじ市阿万中西地区で毎年11月に実施されている津波避難訓練に2年続けて適用し、映像で捉えることができた訓練参加者87人(2016年)、127人(2017年)の行動開始時間・場所(障害要因を取り除けば今すぐにも避難場所への移動を開始する時間・場所)、避難開始時間・場所を把握することに成功している。

しかし、同手法にはUAVのバッテリー交換が原因で一時的に撮影を中断せざるを得ないという課題があった。

例えば、2016年の訓練では、98人の訓練参加者のうち11人(全体の1割程度)の行動を把握できていない。それはUAVのバッテリー交換に伴う4分30秒の撮影中断が一因だったと考えられる。そこで、本研究では、2台のUAVを用いることで撮影中断時間を短くする方策(連続撮影手法)を検討した。

2. 手法

著者らは図-1、図-2に示す流れで連続撮影を実施した。すなわち、撮影地点にいるUAV①の真上に予めもう一台のUAV②を待機させておき、UAV①がバッテリー交換に向かったあと、即座にUAV②を撮影地点に投入する方法(ダウンイン)である。

他にも真横から撮影地点に投入する方法(水平イン)、

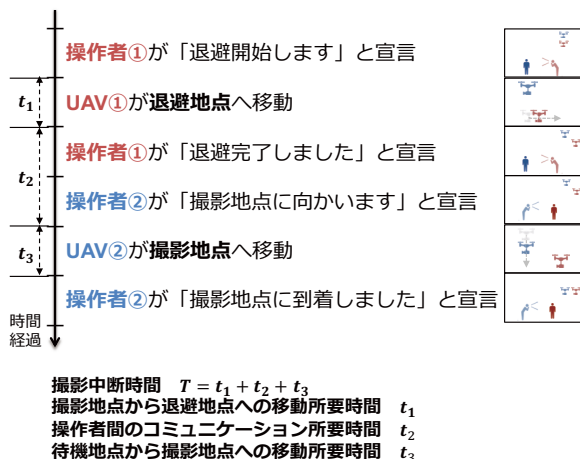
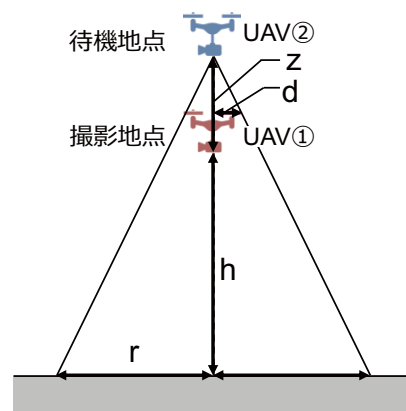


図-1 ダウンイン型連続撮影の流れ



撮影地点のUAVで隠れる範囲の半径 r
 撮影高度 h
 待機地点と撮影地点の距離 z
 UAVの半径 d

図-2 ダウンイン型連続撮影の模式図

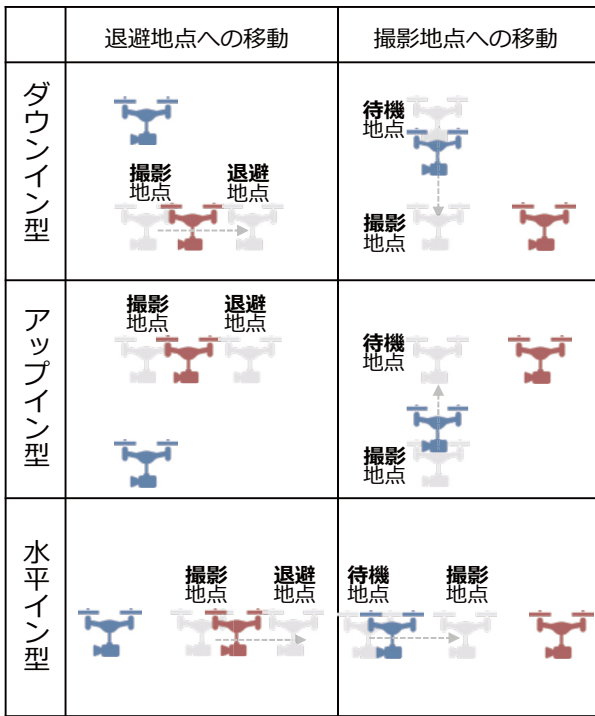


図-3 連続撮影手法の種類



図-4 ダウンイン型連続撮影を実施する様子



図-5 待機地点の UAV②が撮影した映像に映り込む撮影地点の UAV①の様子（撮影高度 150m, UAV 間距離 5m）

真下から撮影地点に投入する方法（アップイン）も考えられる（図-3）。しかし、ダウンイン型連続撮影は、撮影地点にいる UAV①が退避する前に、撮影地点の真上で待機している UAV②が撮影を始めることによって、

表-1 撮影中断時間 T と UAV 間距離 x, z の関係を把握するための検討ケース

ケース	撮影高度	UAV 間距離
1	50m	30m
2	50m	20m
3	50m	10m
4	50m	5m

表-2 撮影地点にいる UAV で隠れる範囲半径 r と撮影高度 h , UAV 間距離 x, z の関係を把握するための検討ケース

ケース	撮影高度	UAV 間距離
1～4	50m	30m, 20m, 10m, 5m
5～8	75m	30m, 20m, 10m, 5m
9～12	100m	30m, 20m, 10m, 5m
13～18	125m	30m, 20m, 10m, 5m
19～24	150m	30m, 20m, 10m, 5m

撮影地点での撮影中断の影響を最小限に止めることができる。したがって、撮影中断時間を短くするという観点からは、これら 3 タイプの連続撮影手法の中でダウンイン型連続撮影がもっとも有用である。

また、2 台の UAV を用いた連続撮影では、両者の衝突事故を絶対に発生させないよう細心の注意が求められる。そこで、安全対策として以下の 2 点を徹底した。

- (1) UAV 操作者は、これから行う UAV 操作に関して宣言するまで決して UAV を動かさない
- (2) UAV の操作に関する宣言文は調査チームで予め決めておく

以上を踏まえ、撮影地点での UAV の映像が途切れる時間（撮影中断時間） T は、式（1）に示すとおり、UAV①、UAV②のそれぞれが移動する時間 t_1, t_3 と、2 人の操作者がコミュニケーションをとる時間 t_2 の合計時間で表される。

$$T = t_1 + t_2 + t_3 \quad (1)$$

なお、時間 t_1 に関しては、操作者が UAV が水平に UAV 間距離 x 以上移動したことを確認した時点で「退避完了」として計測した。

本研究では、待機地点と撮影地点の距離 z と撮影地点と退避地点の距離 x と撮影中断時間 T の関係を明らかにするため、 $x=z=30\text{m}, 20\text{m}, 10\text{m}, 5\text{m}$ の 4 通りの連続撮影をそれぞれ 5 回ずつ実施し、合計 20 回分の t_1, t_2, t_3 をストップウォッチで計測した（表-1）。なお、撮影高度 h は 20 回とも 50m とした。

さらに、ダウンイン型連続撮影は、バッテリー交換に伴って撮影地点で撮影する UAV を別機に交代させる間も、撮影地点の真上にいる待機 UAV に待機中から撮影させることができる。そのため、待機 UAV の映像によって、撮影中断時間内の様子も記録することができる。問題は、待機 UAV の映像には、真下にいる UAV が写り込んでしまう点である。図-5 は、待機地点にいる UAV が撮影した写真である。中央に白く写っているのが撮影地点にいる UAV である。

そこで、本研究では、撮影地点にいる UAV によって隠れる範囲を計測した。具体的には、撮影高度 $h=50\text{m}$, 75m , 100m , 125m , 150m の 5 ケースそれぞれについて、UAV 間距離 $x=z=30\text{m}$, 20m , 10m , 5m の 4 ケースを計測した (表-2)。撮影地点にいる UAV で隠れる範囲は半径 r で表し、撮影高度 h , UAV 間距離 x,z の関係で整理した。撮影地点にいる UAV で隠れる範囲 r は、地上に設置した 30m のメジャーを基準に写真から計測した。

なお、撮影地点にいる UAV で隠れる範囲 r の理論値は、式 (2) を用いて容易に算定でき、実測値との比較に用いた。

$$r = \frac{z+h}{z}d \quad (2)$$

3. 結果

計測によって得られた撮影中断時間 T と UAV 間距離 x,z の関係を図-6 に示す。また、撮影地点にいる UAV で隠れる範囲の半径 r と撮影高度 h , UAV 間距離 x,z の関係を図-7 に示す。本研究で得られた結果のうち、図-6 に関するものを以下の (1) ~ (4) に、図-7 に関するものを以下の (5) ~ (6) に述べる。

(1) 連続撮影による撮影中断時間短縮の効果

ダウンイン型連続撮影の場合の撮影中断時間 T は、2016 年 11 月に南あわじ市で実施したシングル UAV 撮影による調査で生じた 4 分 30 秒と比較し、UAV 間距離 x,z に関わらず大幅に短縮できることが分かった。

UAV 間距離 x,z が短いほど撮影中断時間 T は短くなり、 $x=z=30\text{m}$, 20m , 10m , 5m の場合の撮影中断時間 T は平均でそれぞれで 19 秒、16 秒、11 秒、8 秒となった。

(2) 撮影地点への移動時間と退避地点への移動時間

待機地点から撮影地点に UAV を移動させる時間 t_1 は、撮影地点から退避地点に UAV を移動させる時間 t_3 よりも長い。しかし、その差は UAV 間距離 x,z が短くなるにつれて縮小する。

例えば、 $x=z=30\text{m}$ の場合、撮影地点に移動させるのに要した時間 t_1 は平均 11.5 秒なのに対し、退避地点に移動させるのに要した時間 t_3 は平均 5.2 秒であった。一方で、 $x=z=5\text{m}$ の場合、 t_1 , t_3 はそれぞれ 3.1 秒、2.5 秒となり両者の差は大きく縮小した。

原因として、(1)退避地点への移動は退避地点を通過すればいいのに対し、撮影地点への移動は減速しながら撮影地点に UAV を止めなければならず、同距離の移動でも後者の方が時間を要すること、(2)移動距離 x,z が短くなると十分に加速せずに目標地点に到達するため、時間 t_1 , t_3 の差が小さくなることが考えられる。

(3) 各種作業に要する時間のバラツキ

UAV①, UAV②のそれぞれが移動する時間 t_1 , t_3 は 2 人の操作者がコミュニケーションをとる時間 t_2 と比べて値にバラツキが大きい。

例えば、 $x=z=30\text{m}$ の場合に t_1 , t_3 のバラツキが最も大きくなった。5 回実施して最ももたついたときと円滑に移動させられた時の移動時間の差は t_1 で 3.1 秒、 t_3 で 1.9 秒であった。それに対し、 t_2 のバラツキは全 20 回でも 0.6 秒の差が生じるにとどまった。

これは、UAV を決まった距離だけ移動させることは操作者の技量や慣れ、風や映像の乱れなどのその時々の

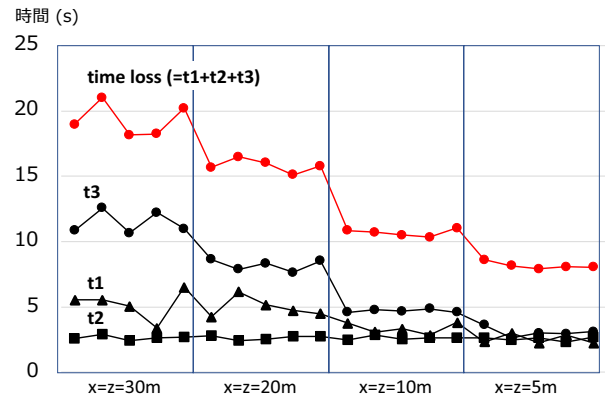


図-6 撮影中断時間 T と UAV 間距離 x,z の関係

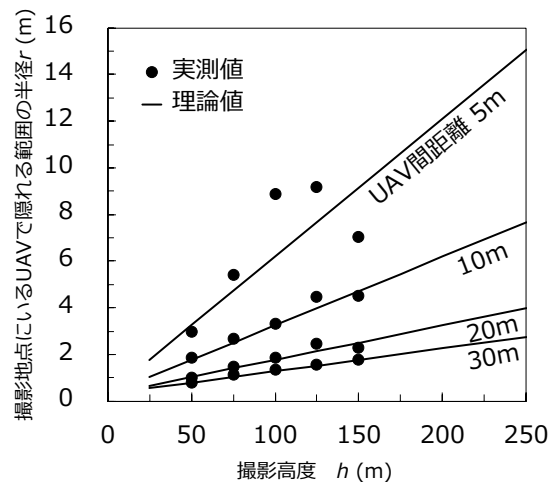


図-7 撮影地点にいる UAV で隠れる範囲の半径 r と撮影高度 h , UAV 間距離 x,z の関係

条件の影響を受けるためであると考えられる。

(4) UAV 間距離と撮影地点 UAV で隠れる範囲の関係

UAV 間距離 5m の場合は、計測値と理論値の差が大きい。UAV の飛行が風などによって安定しないことの影響が UAV 間距離が短いほど大きくなるためと考えられる。UAV 間距離 5m でダウンイン型連続撮影を実施する場合には、撮影地点にいる UAV で隠れる範囲は理論値よりも半径数 m 程度大きくなる可能性があり、その影響を調査前に予測することは難しいと考えられる。一方で、十分な UAV 間距離があれば撮影地点 UAV で隠れる範囲の計測値が安定し、理論値との差が小さくなる。UAV 間距離 10m , 20m , 30m の場合の理論値との差は最大でそれぞれ 0.45m , 0.27m , 0.05m であった。

(5) 撮影地点 UAV で隠れる範囲の大きさ

UAV 間距離を 10m 以上確保すれば、撮影高度を 250m まで上げたとしても、待機中 UAV の映像の中で、撮影地点の UAV で隠れる範囲はせいぜい半径 10m 程度であることが分かった。撮影高度 250m は著者らが過去に南あわじ市で実施した調査で広範囲を撮影するために設けた経験のある最高高度である。また、UAV 間距離が 10m 以上であれば、実際に隠れる範囲が 1m 以上理論値より大きくなることは考えられない。

個別要素法を用いた避難行動シミュレーションの中で、清野ら²⁾は人体の半径を 0.259m でモデル化した。これは

実際の寸法よりもやや大きめで体の揺れも考慮に入れて設定されている。待機中のUAVが撮影地点に到着する前の映像も利用すれば、たとえバッテリー交換に伴って撮影中断時間が数十秒あったとしても、避難訓練時の動きを十分な精度で把握できると考えられる。4分30秒の撮影中断時間中に全体の1割程度の行動を追跡できなかったという課題は、ダウンイン型連続撮影手法を用いれば解消すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、2台のUAVを用いるマルチUAV撮影によって、シングルUAV撮影で余儀なくされるバッテリー交換に伴う撮影中断時間の短縮を試みた。その結果、撮影地点での撮影が中断する時間は30秒未満にまで短縮できることが分かった。また、UAVの待機地点を撮影地点の真上に設定し待機中から記録した映像を用いれば、撮影地点のUAVによって遮蔽される範囲はあるものの、避難訓練時の動きを十分な精度で把握できると考えられる。

今後、実際の避難訓練に同手法を適用するにあたって、UAV同士の接触事故を回避するために、どの程度のUAV間距離を確保するか、本研究によって得られた成果を参照しながら設定されたい。

謝辞：本研究は、京都大学大学院工学研究科 上大迫弘隆氏による調査協力を得た。また、本研究の一部は、JSPS 科研費（基盤研究（A）17H01287）、JSPS 科研費（研究活動スタート支援 17H07346）、日本旅客鉄道株式会社による受託研究費による支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土肥裕史，奥村与志弘，上大迫弘隆，清野純史，無人航空機を用いた津波避難開始行動調査手法の提案，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），2018．（印刷中）
- 2) 清野純史，三浦房紀，八木宏晃：個別要素法を用いた被災時の避難行動シミュレーション，土木学会論文集，591号，pp.365-378，1998．