

# ドローンとHMDを利用した高高度3D視聴システムの開発

## Development of High-Altitude 3D Viewing System by Drone and HMD (Head Mount Display)

岡村 俊彦

OKAMURA Toshihiko

キーワード：ドローン, HMD, 3D視聴システム

Key words: Drone, HMD, 3D Viewing System

### 1. はじめに

#### 1-1 ドローンの活用

近年のドローンの進化にはめざましいものがあり、その利活用はホビー用途のみならず、産業分野でも広がりを見せている。もともとドローンは無人航空機（UAV=Unmanned Aerial Vehicle）全般を指すものであったが、最近では、コンピュータ制御された自律飛行が可能な飛行体、とりわけ4つ（もしくはそれ以上）のローター（プロペラ）をもつマルチコプターの呼称となってきている。本論文ではこの狭義のドローンを対象としている。

ドローンにはジャイロセンサーや距離センサーといった各種センサー、複数のモーターを制御するマイクロプロセッサ、本体とコントローラー間の通信をおこなう通信機器など、近年のICT技術の進展で小型化、低価格化がなされた各種デバイスが利用されており、信頼性、耐久性も向上している<sup>1)</sup>。信頼性、耐久性の向上にとともに、ホビー用途中心から、測量、空撮、点検・検査といった産業用途へ拡大しており、産業用ドローンの2018年度の市場規模は319億円といわれ、現在は実証段階である輸送用途も実現した場合、2024年度には1500億円を超える市場に成長すると予測されている<sup>2)</sup>。

#### 1-2 HMDの活用

HMD（Head Mount Display）とは、ウェアラブルデバイスの一種で、視聴者の頭部に装着するゴーグルやメガネ型のディスプレイである（図1-1）。1つの小型ディスプレイを片目で見えるもの（単眼型）もあるが、多くは左右の目それぞれで小型ディスプレイを見ることにより、仮想的な画面を見る両眼型である（図1-2）。動画視聴やゲーム用として1990年代より民生品が販売されるようになった。近年のVR（仮想現実）やMR（複合現実=現実の画像とCGなど仮想の画像を組み合わせた技術）のブームによりさらなる普及拡大につながった。近年は建設業におけるシミュレーションや工場での作業支援など産業用途にも広がりを見せている<sup>2), 3)</sup>。

人間工学の分野においてコンピュータをはじめとしたディスプレイを用いたVDT作業に関する研究は古くからおこなわれているが、目に至近距離で光刺激を発するHMDに関する研究も近

年に増えてきている<sup>4), 5), 6)</sup>。特に身体(頭部)の動きと画面が連動するVR視聴は現実空間の視聴に近いものの、動きと画面のタイムラグなどが原因となり、違和感(VR酔い)を感じることも報告されている<sup>4)</sup>。



図 1-1 HMDの装着例

(左) ゴーグル型 (SONY製HMZ-T1)  
(右) メガネ型 (EPSON製MOVERIO BT-300)

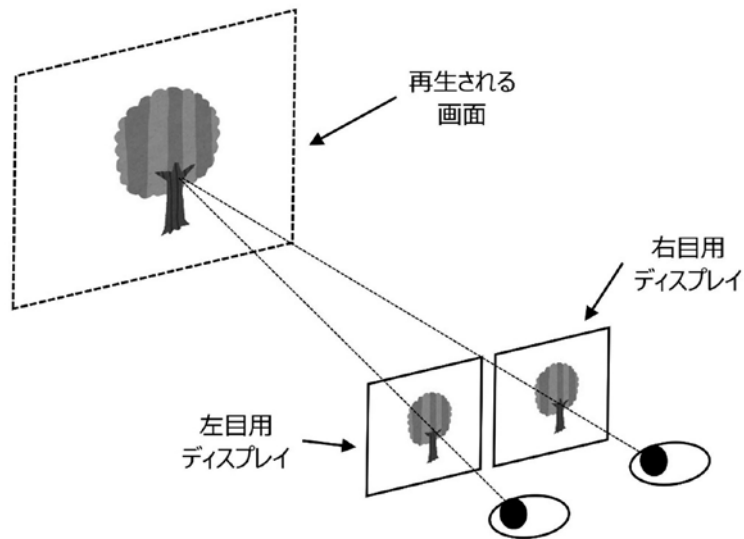


図 1-2 両眼型HMDの仕組み

### 1-3 3D視聴

人間の視覚系で対象物を立体的に認識する情報としては、単眼立体情報と両眼立体情報に分けられる。単眼立体情報では、隠蔽(手前の対象が奥の対象を隠す状態)、相対的サイズ(既知もしくは比較対象物とのサイズの違い)、運動透視(視点移動の際に生じる視野内での移動速度

の違い)、水晶体調節(水晶体におけるピント合わせ)などがある。両眼立体情報ではとしては輻輳(左右の眼球で対象物を見るための角度)と両眼視差がある。輻輳とは、対象が近いほど両眼の視線が内側に寄る動きのことであり、遠方の対象物を見る場合は視線が平行に近くなる(図 1-3)。両眼視差は 1 つの対象物の網膜像が左右で異なる事から立体や距離を認識することである(図 1-4)<sup>7)</sup>。

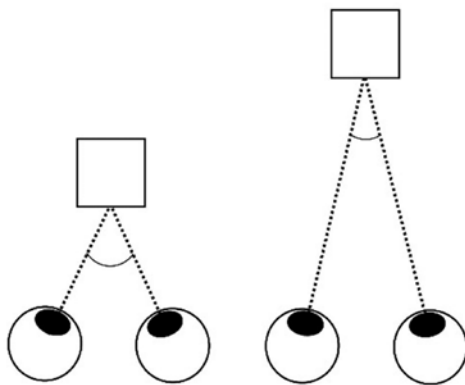


図 1-3 輻輳による遠近感の認識

両眼の内側に寄る角度の違いにより遠近感を認識する

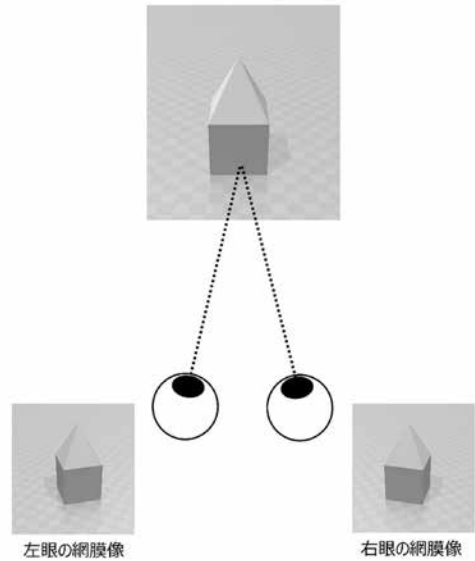


図 1-4 両眼視差による立体物の認識

左右の網膜像の違いにより立体物を認識する

3D 映像を認識させる多くのデバイスは右眼と左眼に異なる画像を見せ、この両眼視差を利用して。古くは片側が赤、片側がシアンなどのカラーフィルタのメガネをかけることで、それぞれ異なる画像を見せるアナグラフという手法があるが、画像の色に制限がでるため、今ではほとんど使われていない。最近ではカラーフィルムの代わりに偏光フィルタや液晶シャッターを用いたメガネを使うことで、映画館など大画面を同時多人数で視聴可能な仕組みが普及している。色の制限はなくなるが、画像情報の半分を隠すことになり、映像が暗くなる欠点がある。

前述の通り、HMDは左右の眼でそれぞれ小型ディスプレイを見る仕組みであり、2つのディスプレイに異なる映像を映すことで、3D映像を視聴することが可能である(図 1-2, 図 1-4)。元になる映像は横に離れた2つのカメラを使って撮影することが多く、人間の左右の眼で見たような映像を再現しているため、他の方式に比べ、鮮明な3D視聴が可能である。

3D映像の視聴は映像酔いや眼精疲労を引き起こすことが報告されている<sup>8)</sup>。HMDによる立体映像視聴の場合、輻輳や単眼立体情報に制限があるため、融像(2つの映像を融合して1つの立体物として認識する)可能な範囲が限られている。融像可能範囲を外れた映像は二重視となり、3D映像としての認識ができなくなる<sup>7) 9)</sup>。

ソースとなる映像撮影においては、左右のカメラ間隔、輻輳角（内側に傾ける角度）、画角、焦点距離といったパラメータがある（図1-5）。カメラ間隔は人間の瞳孔間隔と同じ6cm程度が用いられることが多いが、近距離（4m以内）の被写体では3D映像が見えづらくなる。3cm程度のカメラ間隔だと1.5m以上離れていれば、見やすい3D映像となる。輻輳角は1度程度が最適とされている<sup>9)</sup>。

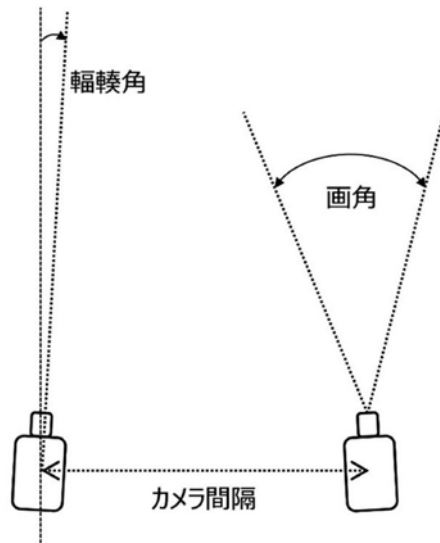


図1-5 3D映像撮影時のパラメータ

輻輳角：カメラが内側に傾いている角度

画角：1台のカメラの撮影範囲

カメラ間隔：左右2つのカメラの間隔

#### 1-4 高高度映像の3D視聴

前述の通り、ドローンが急速に普及し様々な用途で使われている中、全天球（360度）カメラによる撮影例はあるが、ドローンに複数のカメラを搭載した3D映像撮影をおこなった事例は見られない。これには①複数カメラを搭載することによる重量増、②遠方映像の3D効果が少ない、といった理由が考えられる。前者については、アクションカメラなど小型かつ高画質なカメラが普及しつつあることから、ハードルが下がっているといえる。後者についてだが、遠方映像の場合、必然的に左右の映像の差異（画像視差）が少なくなり、通常のカメラ映像（2D）と体感的にあまり変わらないことから、研究や実証が少ないものと思われる。ただ、災害時の利用や高所での点検など、今後のドローンの用途を考慮すると、高高度映像での3D視聴特性を明らかにすることは重要であると思われる。また遠距離の場合はカメラ間隔を広くすることで、左右のカメラ画像の差異を明確にし、より立体感のある3D映像を視聴できる可能性がある。

そこで、今回はドローンに2台のビデオカメラを取り付け、高高度からの3D映像を撮影し、HMDにて視聴するシステムの作成を試みた。

## 2. 高高度 3D 視聴システム

### 2-1 撮影機材

撮影はドローンに 2 台の小型ビデオカメラを取り付けておこなった。

ドローンは DJI 社製の MAVIC PRO を使用した。このドローンは 4 つのプロペラで飛行し、障害物センサー、GPS などを搭載する同社では比較的小型の機種である。プログラム飛行も可能だが、今回は付属の無線コントローラーを用いて操作した。内蔵のカメラは飛行操作用に利用したが、撮影素材用としては使用しなかった。

小型ビデオカメラは SONY 製の FDR-3000X を 2 台使用した。これは小型軽量（撮影時重量が 1 台あたり 113.9g）で、最高 4K 画質（3840 × 2160 画素）の動画撮影が可能である。また、画角を 3 段階（ワイド=105 度、ミディアム=80 度、ナロー=60 度）に切り替えられる。今回は後述する HMD の視聴画角と画質を考慮し、ミディアムとナローの 2 種類の撮影を HD 画質（1280 × 720 画素）でおこなった。また、ドローン本体カメラと違い、振動防止のジンバルがないため、ビデオカメラ内蔵の手ぶれ補正機能を使用した。

カメラをドローンに取り付けるにあたり、STARTRC 社の外部カメラ固定キットを利用し、下部のカメラ固定器具に木製のカメラ固定バー（自作）を取り付けた（図 2-1）。カメラ固定バーにはカメラ間隔を調整できる固定用の穴を開けた。間隔 110mm 以下はドローン本体が干渉するため取り付けができず、250mm 付近はドローンの脚の部分がカメラの直前にきて撮影できないため、120mm、180mm、360mm、480mm の 4 段階として、撮影前に輻輳角 1 度で取り付けることとした（図 2-2）。また、固定バーをドローン下部に取り付けたため、離着陸時に地面と干渉しないように PGYTECH 社製の着陸ガードをドローン脚部に取り付け、着陸時にドローン本体と地面の間に 40mm のクリアランスを確保した。撮影機材の総重量は 1,106g となり、ドローン本体のみの飛行に比べ、50.7%（372g）の重量増加となった（表）。バッテリー 1 つあたりの飛行可能時間は 15 分程度（本体のみの飛行では 25 分程度可能）となったが、飛行そのものは安定していた（図 2-3）。ただし、カメラの取り付け位置を 480mm にした場合は横方向へのモーメントが大きくなるため、左右のふらつきが見られる場合もあった。



図 2-1 カメラ固定キット（上）とカメラ固定バー（下）

取り付け時、本体下部の高度センサーをふさがないように固定バーの中央を削ってある

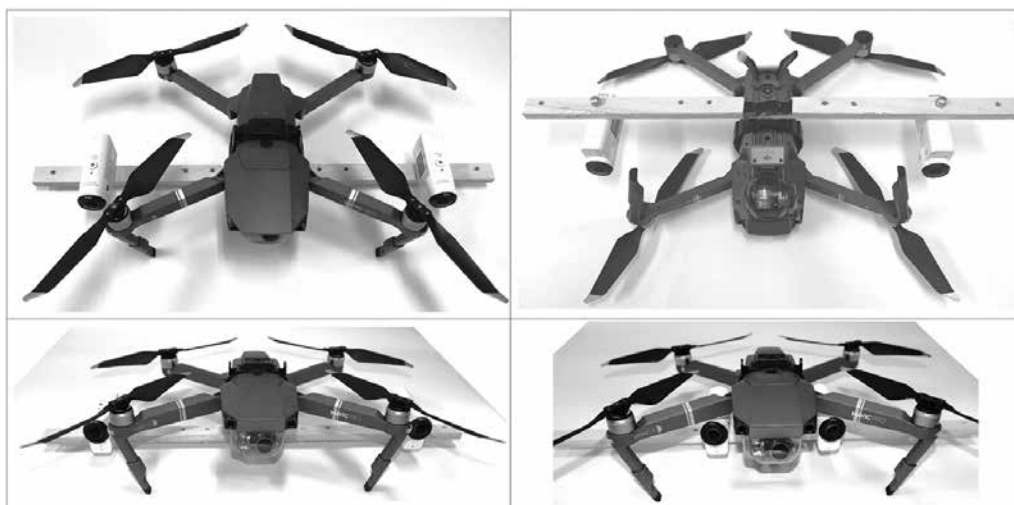


図 2-2 ドローンへのカメラ固定

- (左上) 上部から見た取り付け例 (カメラ幅 360mm)
- (右上) 下部から見た取り付け例 (カメラ幅 360mm)
- (左下) 前部から見た取り付け例 (カメラ幅 360mm)
- (右下) 前部から見た取り付け例 (カメラ幅 120mm)

表 撮影機材重量

項目	重量 (g)
ドローン本体	734
ランディングギア	68
カメラ固定キット	26
カメラ固定バー (取付ネジ含む)	50
カメラ本体 (2台分)	228
合計重量	1,106



図 2-3 カメラ取付時の飛行の様子

3D 映像の視聴では左右の映像にタイムラグが生じると、違和感を感じたり、立体映像には見えないこともある。そこで、撮影時は 2 つのカメラが同期するように、スマートフォン用アプリ（SONY 製 PlayMemories Mobile）のマルチカメラコントロール機能を用い、録画開始時間を同期させた。

4 段階のカメラ間隔、2 段階のカメラ撮影画角の合計 8 種類、それぞれ 10 分程度の撮影をおこなった。最高で 50m の高度まで上昇し、15 ～ 30m の高度からの撮影を中心におこなった。

人口密集地におけるドローンの飛行は小型無人機等飛行禁止法によって規制があり、特定の条件下に限られている。そこで撮影は 2019 年 2 月から同年 4 月の晴天時に人口密集地外である鹿児島市花尾町の無人の広場にておこなった。

## 2-2 映像処理

今回は後述する HMD にて 3D 視聴が可能なサイドバイサイド方式の映像フォーマットを作成した。2 台のカメラにて撮影された HD 画像（MP4 形式）をパソコンに取り込んだ後、動画編集のソフトウェアである Dual Screen Video Maker（AuDane Software 社）にて、2 つの動画を左右に並べた 2560 × 720 ピクセルの動画に変換し（図 2-4）、さらに動画形式を修正するソフトウェア HandBrake（The HandBrake Team によるフリーソフト）にて横方向を圧縮した 1280 × 720 ピクセルの MPEG4 形式の動画（図 2-5）に変換をおこなった。

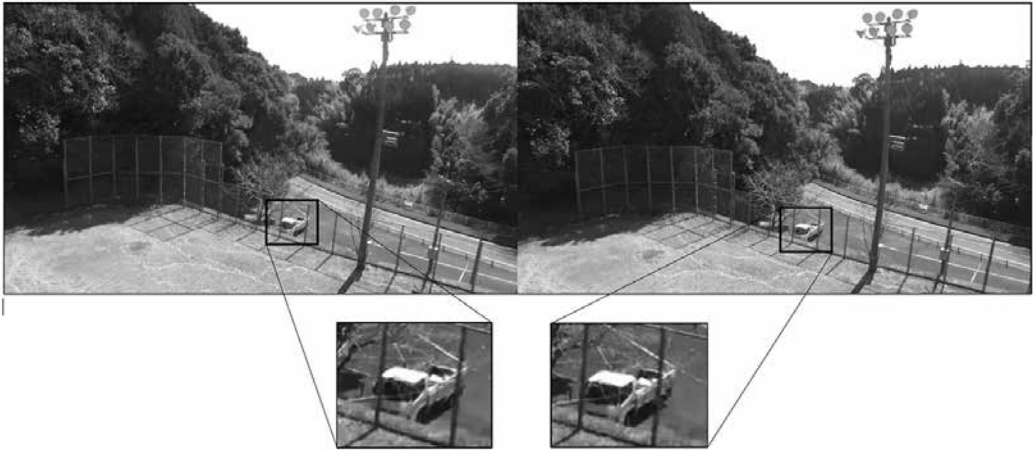


図 2-4 左右カメラ合成画像

拡大部（下）を見ると左右カメラの画像視差が分かりやすい

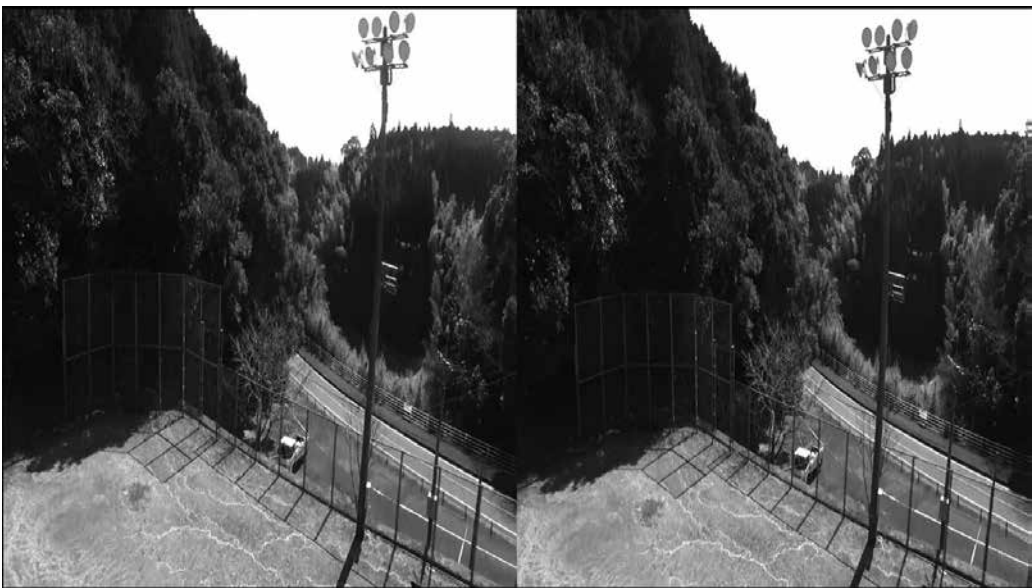


図 2-5 サイドバイサイド方式による3D視聴用の画像

図 2-4 の画像を横方向に圧縮した画像

### 2-3 視聴システム (HMD)

今回は2種類のHMDを使用し、3D動画の視聴をおこなった。一つ目はゴーグル型のSONY製HMZ-T1(図1-1左)である。ゴーグルの内側には左眼用、右眼用に2つの小型の有機ELパネル(解像度1280×720ピクセル)が内蔵されている。視野角は約45度であり、20m先に750インチの画面が仮想的に見えるようになっている。もう一つはメガネ型のEPSON製MOVERIO BT-



## ドローンと HMD を利用した高高度 3D 視聴システムの開発

300 (図 1-1 右) である。フレーム部には左眼用, 右眼用の 2 つの小型の有機 EL パネル (解像度 1280 × 720 ピクセル) が内蔵され, 眼球前のハーフミラーに映し出す仕組みである。視野角は約 23 度であり, 20m先に 320 インチの画面が仮想的に見えるようになっている。ハーフミラーを使用しているため, シースルー (肉眼で外部を見ながら映像を視聴) も可能だが, 今回はシェードをつけて, 仮想画面のみが見えるようにし, ゴーグル型と視聴条件を近づけた。

いずれの HMD も左右それぞれに異なる映像をそれぞれ映し出すことが可能であり, 前述の画像処理をおこなった映像をサイドバイサイド方式で視聴した。これは図 2-5 の画像の左右半分ずつを横方向に伸ばして左右それぞれの画面に映し出す方式で, 他の方式に比べ, 比較的鮮明な 3D 映像を視聴することができる。撮影画像の解像度と HMD の解像度はいずれも 1280 × 720 ピクセルであるが, 横方向はサイドバイサイド方式のため, 実質的な解像度は半分の 640 ピクセルとなる。縦方向は撮影時の解像度と同じ 720 ピクセルで視聴となる。

### 3. システムの視聴試行

5 名の短期大学生 (女性, 18 ~ 20 歳) を被験者とし, 2 種類の HMD で高度 15m ~ 30m にて撮影した映像を 3 分間視聴のうえ 3D 映像に関する主観報告をおこなってもらった。

3 段階のカメラ間隔 (120mm, 180mm, 360mm), 2 段階のカメラ画角 (60 度, 80 度) 計 6 種類の映像を視聴対象とした。カメラ間隔 480mm の場合は, 他の間隔に比べ, 横方向への揺れが大きく, 視聴の対象外とした。

被験者全員が 6 種類の画像いずれも 3D 映像として認識した。映像の中でも, 距離の差が大きい対象 (近距離の照明灯や木と遠景など) の場合は 3D 効果が高いことが報告された。また, カメラ間隔が広いほど 3D 効果が高いと報告された。カメラ画角の違いによる 3D 効果の主観的な差は報告されなかったが, カメラ画角が 80 度の場合に比べ, 60 度の映像の方が臨場感があるとの報告があった。さらに, ゴーグル型の HMD の方がメガネ型 HMD の方が 3D 効果が高く, 臨場感も高いと報告があった。

### 4. 考察

ドローンによる高高度からの映像を左右 2 つのカメラで撮影し, HMD を用いて 3D 映像として視聴するシステムを開発することができた。一般的な映像に比べ, 高高度からの映像は視聴対象の距離が遠く, 両眼視差が少ないため, 3D 効果は小さいとされている。一般的な 3D 撮影は人間の瞳孔間隔に近い 60 ~ 70mm を用いるが, カメラ間隔を広くすることで, 高高度からの撮影でも左右の映像の違い (仮想的な両眼視差) が明確となり, 3D 効果が得られることがわかった。特に映像内に近距離の対象物がある場合は, その効果が高くなる。立位における瞳孔の高さは約 1.5m (日本人成人女性平均) なので, 今回視聴対象とした高度 15m ~ 30m からの映像は 10 ~ 20 倍の高さとなる。単純に高さ と瞳孔間隔を比例させると 600 ~ 1400mm の左右の間隔となるので, カメラ間隔を今回のシステム (最大 480mm 間隔) から, さらに広げることができれば, より臨場感が高くなると思われる。原理的にはカメラ間隔が狭い場合は, 「視聴者

自身が高い場所から視聴する感覚」であるのに対し、カメラ間隔を広げた場合は、「視聴者自身が巨大化した感覚、もしくは視聴対象が縮小（ミニチュア化）した感覚」となる可能性もある。今回使用したドローンはやや小型であったため、カメラ間隔480mmではやや不安定な飛行となった。よりカメラ間隔を広げるためには、①大型のドローンの使用、②カメラの軽量化によるモーメントの短縮、③2台のドローンによる撮影といった方略が考えられる。①大型ドローンの使用については、民生用のドローンではある程度限界があり、②カメラの軽量化については、今回のカメラは手ぶれ防止機能内蔵のハイビジョン撮影可能なビデオカメラでは最軽量の部類にはいるため、現時点では代替案はあまりない。③2台のドローンによる撮影なら、カメラ間を数メートル離すことも可能であるが、プログラミング飛行をおこなったとしても、撮影対象や飛行間隔、撮影幅角などを正確にコントロールすることは困難であろう。いずれの方略が有効であるかは今後の技術発展にも左右されるといえよう。

今回のシステムでは撮影画角やHMDの視聴画角の影響も見られた。メガネ型HMDは視聴画角が狭い（23度）こともあり、主観的には遠くの小さい窓を覗いているような感覚となるため、やはり大きな視聴画角の方が3D効果、臨場感ともに高くなることが明確となった。比較的狭い画角の映像をゴーグル型HMDで視聴した場合がもっとも3D効果が高い臨場感のある映像であることが報告されたが、これはHMDの視聴画角の広さだけでなく、撮影画角（60度）と視聴画角（45度）が最も近い角度であることも要因であると考えられる。より大きな視聴画角をもつHMDを用いて、その視聴画角に近い撮影画角の映像を視聴することで、さらに現実に近い視聴ができる可能性がある。

ドローンが様々な分野で活用され始めたのは2010年代後半からであり、今後も飛躍的な成長が予想されている。ホビー用途以外では農薬散布や育成調査を中心に農業における利用が多かったが、近年は測量、構造物の点検などにも使われており、警備や監視、輸送といった活用も試行されている<sup>1)</sup>。法的な整備やインフラの整備が必要になるが、配送ビジネスにおけるドローンの活用も期待されている<sup>10)</sup>。ドローンからの映像を従来の単一カメラだけでなく、リアルタイムで3D映像の視聴できるようになると活用法はさらに広がると思われる。例えば、全国的に老朽化が問題となりつつある道路橋（全国で6割以上が建築後50年を超えると想定<sup>2)</sup>）などの大規模な構造物は、ドローンを活用することで安全かつ簡便に点検できるようになってきたが、3D映像により、立体構造物に対する正確な点検をおこなうことが可能であろう。災害時の探索や救助において人が立ち入ることでおこる二次被害を防ぐため、ドローンが活用されつつある。2017年7月の九州北部集中豪雨被害の調査でも災害現場での運用がなされ<sup>1)</sup>、他にも多くの災害において、ドローンの活用が検討されている<sup>11)</sup>。自然災害、人災にかかわらず、大規模な災害時でも3D映像を使うことができれば、危機状態や救助の見逃しの減少や、より正確な場所への物資の搬送などもできるようになるであろう。これらの活用で3D視聴をおこなうには両眼3Dが可能なHMDなどのデバイスが必要であり、より視聴画角が広く鮮明な画質のHMDを利用することが望まれるが、多人数での同時視聴ではHMDだけでなく映画館などでも使われている偏光フィルタや液晶シャッターを用いた方式も利用できるであろう。さらに360度カメ

## ドローンと HMD を利用した高高度 3D 視聴システムの開発

ラで撮影した映像を仮想空間としてHMDにより視聴するVR（仮想現実）視聴もホビー用途だけでなく建設業やインテリア業界などでも普及が進んでおり、人間工学的な研究<sup>12)</sup>も進んでいるが、これに、3D技術を組み合わせたシステムを開発することで、多くの分野への応用も期待できる。

今回開発したシステムで、高高度映像の3D視聴が可能となったが、視聴のしやすさ、3D効果の大小、3D酔いの低減など人間工学的な観点から見た適切なカメラ間隔、画角、輻輳角については、さらに綿密な実験と検証が必要であろう。今後はこれらの撮影時のパラメータとHMDを中心とした視聴デバイスの特性、映像内容との関連についても研究をすすめていきたい。

### 参考文献

- 1) 野波健蔵「ドローン産業応用のすべて」オーム社、2018年2月
- 2) 野村総合研究所ICTメディア・サービス産業コンサルティング部  
「ITナビゲーター2019年版」東洋経済新報社2018年12月
- 3) EPSONスマートグラス ウェブサイト (2019.8.28 閲覧)  
<https://www.epson.jp/products/smartglasses/>
- 4) 兵頭啓一郎, 氏家弘裕, 多田充徳「ヘッドマウントディスプレイの人間工学—国際標準制定に向けて—」, 人間工学Vol. 54, Supplement S7-1, 2018
- 5) Takashi Kawai, "Ergonomics in Advanced Imaging Technologies", The Japanese Journal of Ergonomics Vol.53, Supplement, pp.26-29, 2017
- 6) Jaramier Cobrado Joibi, Yong Min Kim, Gee Won Shin, Kyung-Jun Lee1 & Myung Hwan Yun, "A Systematic Review of Extended Reality (XR)'s Head-Mounted Display (HMD) Hardware Design Factors from the Perspective of Usability", The Japanese Journal of Ergonomics Vol.55, Supplement, 1H3-3, 2019
- 7) 河合隆史, 盛川浩志, 太田啓路, 阿部信明, 「3D立体映像表現の基礎」オーム社, 2000年9月
- 8) Marc Lambooi & Wijnand IJsselsteijn, "Visual Discomfort and Visual Fatigue of Stereoscopic Displays: A Review", Journal of Imaging Science and Technology Vol.53 No.3 pp 03201-1 ~ 14, 2009
- 9) 3Dコンソーシアム3D価値向上委員会ウェブサイト “一般向け実写3Dコンテンツの撮影・編集・視聴の資料” (2019.8.28 閲覧)  
[http://www.3dc.gr.jp/jp/scmt\\_wg\\_rep/guide\\_index.html](http://www.3dc.gr.jp/jp/scmt_wg_rep/guide_index.html)
- 10) 小池良次「ドローンビジネスレポート」, 内外出版社, 2018
- 11) 西隆一郎, 鶴成悦久「自然災害時における低価格マルチコプターの地域的な利活用」, 鹿児島県建設技術センターに提出の報告書, 2017
- 12) Yoshihiro Banchi, Shota Tsukada, Keisuke Yoshikawa & Takashi Kawai, "Behavioral and psychological effects by short time viewing 360 videos using a HMD", The Japanese Journal of Ergonomics Vol.53, Supplement, pp.660-663, 2017

