

高精度自動離着陸・航行ドローン

=RTK-GNSS によるドローン自動飛行技術の開発=

i システムリサーチ(株)

西川 啓一

徳島大学

三輪 昌史

(株)アース・アナライザー

荒木 寿徳

高精度自動離着陸・航行ドローン

High precision automatic take-off and landing drone using GNSS

RTK-GNSSによるドローン自動飛行技術の開発

iシステムリサーチ(株) 西川 啓一
徳島大学 三輪 昌史
(株)アース・アナライザー 荒木 寿徳

1. はじめに

軍事目的で開発が開始されたドローンは、2010年以降にホビー用途で一般化し、産業用途で格段の進歩を遂げた。2018年度調査によると国内のドローン関連市場は931億円、2020年には2,185億円になると予想されている（第1図）。

その用途では、2016年には農業用が70%近くであったが、2020年では土木・建築用が急激に伸び、点検用途を加えると農業用を上回り、今後ますます土木・建築、防災関連に活躍の場を急速に広げていくものと予想されている（第2図）。

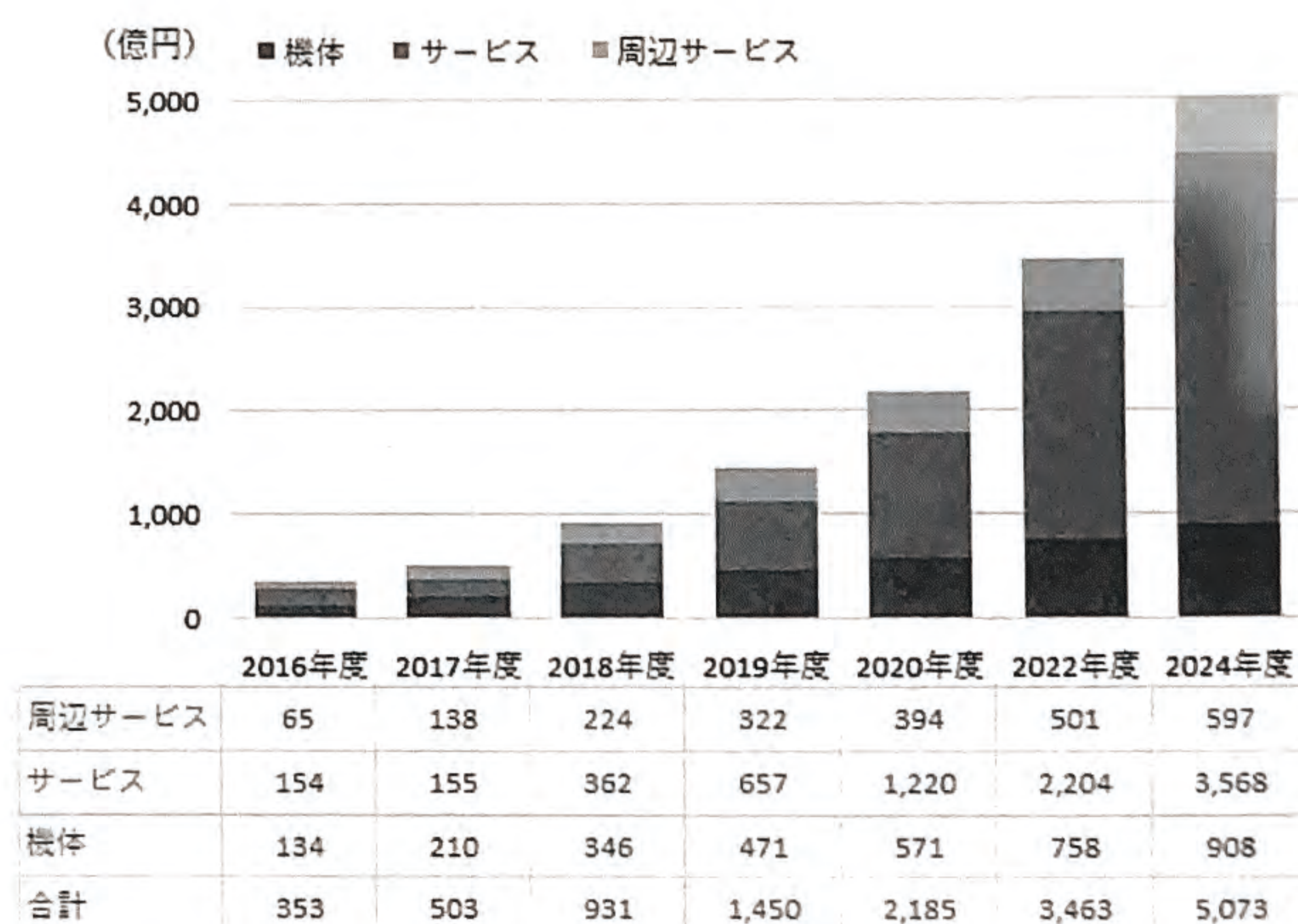
土木・建築関連用途では現在のところ、

- ① 工事現場、維持管理周辺の空撮
- ② 近接撮影
- ③ 地図作成
- ④ 三次元地形モデル作成

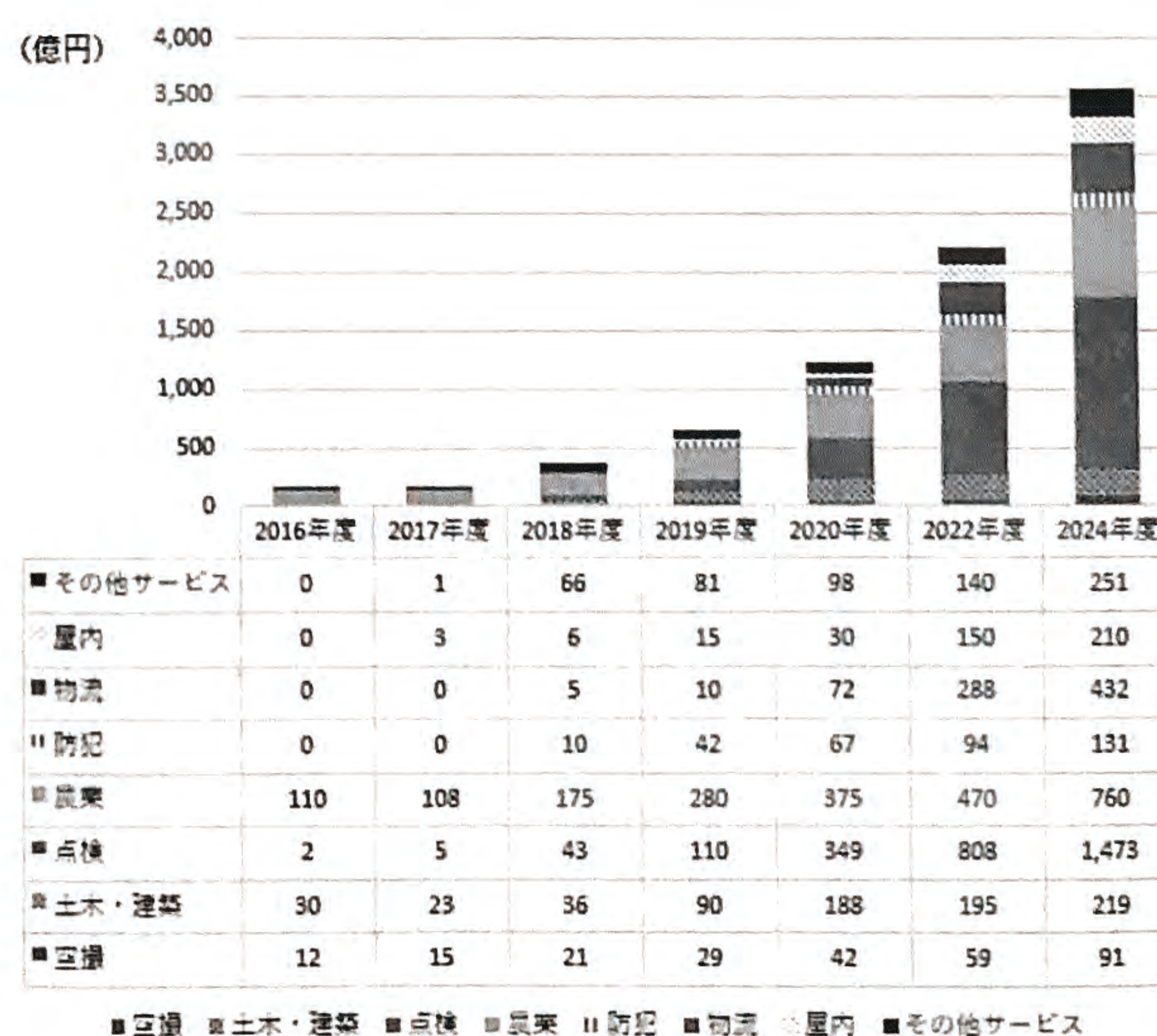
が主な用途になっている。

工事現場等の空撮としては、客観的な進捗管理を画像で把握したいという目的のほか、立ち入りしにくい範囲や危険な現場を撮影し、安全確認や計画立案等に活用する目的がある。また、空中撮影写真を用いて3次元モデルを生成することで、土量管理や測量に活用する場合も多い。

一方、橋梁や堤防あるいは風力発電施設など構造部材のひび割れ・腐食等調査に近接目視の



第1図 ドローン市場の推移
(出典：「ドローンビジネス調査報告書2019」インプレス総合研究所)



第2図 ドローンの利用用途別推移
(出典：「ドローンビジネス調査報告書2019」インプレス総合研究所)

代替としてドローンを利用するケースもある。この場合、ドローンを撮影対象物に接近させ、一定の距離を保ったまま飛行する必要がある。これまでは、このような用途ではパイロットが目視飛行でいわゆる名人芸を見せて、撮影対象物から数m離れて平行に飛行、カメラを正対させて撮影していた。最近ではFPV (First Person View) というパイロットがまるでドローンに乗っているかのような視点で操縦できる技術が登場し、より正確に撮影対象物に添って飛行できるようになってきた。しかしこのような操縦は訓練して一朝一夕にできるものではなく、これらのパイロットが不足してきている。

これを解決するために、様々な高精度な位置情報取得手法が提案されている。例えば、ドローン搭載カメラ画像からAIを利用し構造物に沿って飛行する技術や、レーザーレンジファインダによる計測データを用いるSLAM (Simultaneous Localization And Mapping) を使って自己位置を推定し対象物に沿って自動飛行する技術も開発されてきている。

本稿では、GNSSを利用したRTK-GPSによる高精度自動離着陸・航行ドローン（以下、精密航行ドローン）について紹介する。

2. GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite System) とはアメリカのGPS (Global Positioning System) にロシアのGlonass (Global Navigation Satellite System)、EU連合のGalileoおよび中国のBeidouの全地球測位システムとこれらに加え、日本のみちびき (QZSS)、インドのNavICなど地域型を含めた各国が運用している衛星測位サービスの総称である。GPSという名前は一般ではカーナビにおいて名前が知られるようになり、最近では携帯電話にも搭載され、子供たちがどこにいるかを知らせてくれる便利な道具として名前が浸透した。GPSにおいては現在、32個の衛星

が地上20,200km上空を約11時間56分4秒毎で周回している。各衛星は10.23MHzの基準発信機を持っており、その154倍の $L1 = 1575.42\text{MHz}$ と120倍の $L2 = 1227.6\text{MHz}$ など、複数の周波数の電波を地球全体に向けて発信している。GlonassやGalileo、Beidouもそれぞれ複数の電波を地球に向けて発信している。

測量用に利用されるGNSS受信機は衛星から送信される搬送波 $L1$ 、 $L2$ の位相を使用する (Glonassの場合は $G1$ 、 $G2$ 、Galileoの場合は $E1$ 、 $E5$ 、Beidouの場合は $B1$ 、 $B2$)。

$L1$ (1.57542GHz) の搬送波を利用した場合、1波長は約19cmであり、その1/100程度の位相分解能を得ることは比較的容易である。よってmmオーダの精度で測距が可能となる。水平方向、高さ方向とも標準偏差で数cmオーダの測位が可能となるため、精密かつ実時間性を要する測位分野での利用が進んでいる。また、その利用の手軽さから土木・建築、測量等の分野にも応用されている。

GNSSの測位の原理を簡単に説明する。あるGNSS衛星 SV^i が時刻 T^i に電波を発信したとする。その電波をGNSS受信機 RCV_u が時刻 T_u に受信した場合、電波の到達に掛った所要時間 (伝播時間: τ_u^i) がわかる。この所要時間に光速 c を掛けたものを擬似距離 ρ_u^i と呼ぶ。これがすなわち、GNSS衛星 SV^i と受信機 RCV_u の距離が判る。

$$\rho_u^i = c \cdot (T_u - T^i) = c \cdot \tau_u^i \quad \dots(1)$$

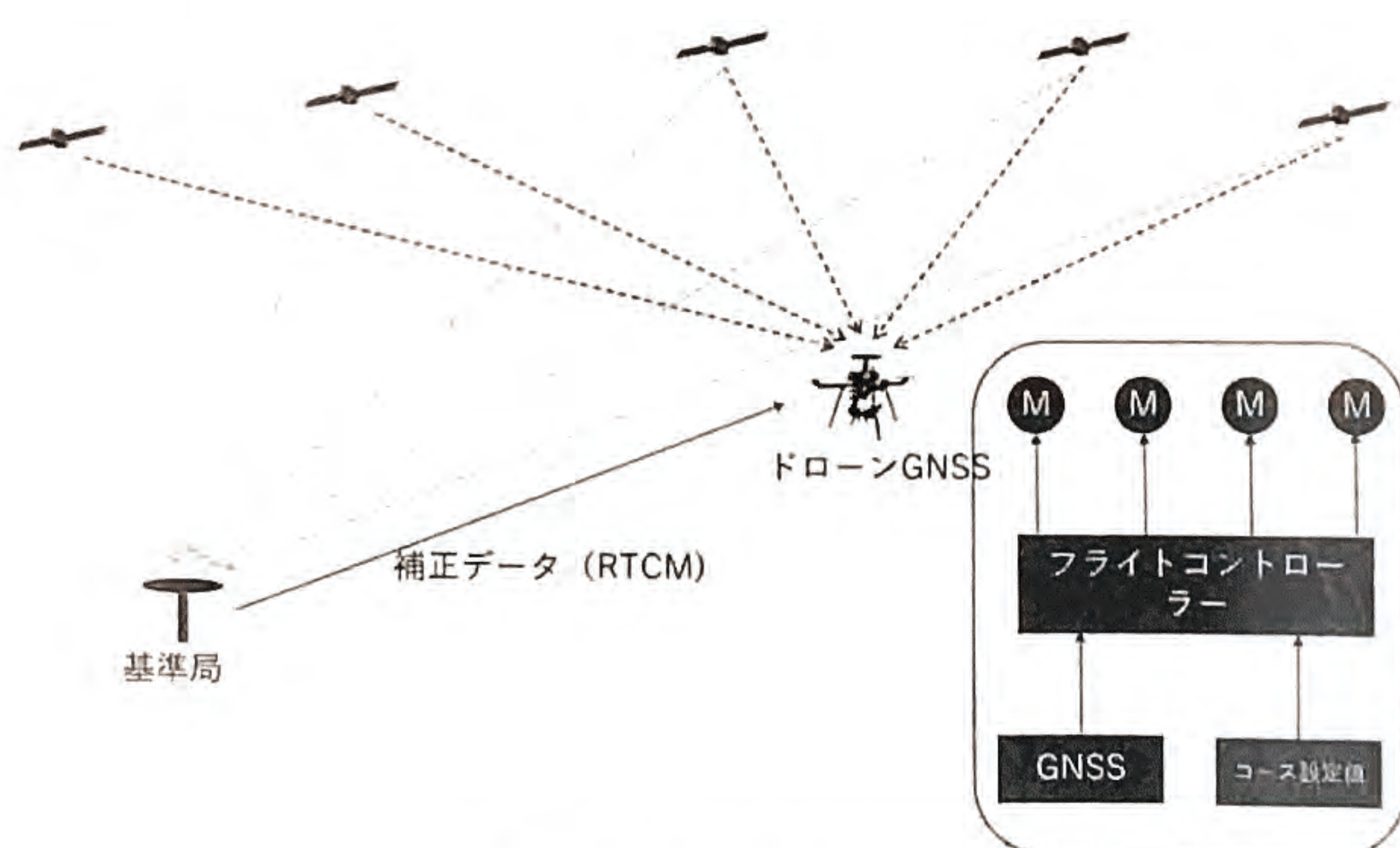
ここで、 c は光の速度である。これを最低四つのGNSS衛星 SV^1 、 SV^2 、 SV^3 、 SV^4 で求める。理想的に言えば、GNSS受信機の時計がGNSS衛星の時計と正確に一致していれば、三つのGNSS衛星との距離を求めればよいが、残念ながらGNSS受信機の時計は多少狂っている。そのため、四つのGNSS衛星からの電波を受信し、時計の補正を含めて、ユーザ位置 (x, y, z) と時計誤差 δt_u の四つの未知数を四つ以上の衛星

関西地方であれば40～45機を捕捉する。GPS衛星のみであると9機になる（○印）。本稿で使
用したGNSS受信機ではこれら捕捉した衛星か
らの電波に基準局からの補正データを加え、さ
らにマルチパスやノイズの解析を行い、精度を
保てる電波のみ使用し測位を行う。これにより
水平方向6mm、高さ10mm（メーカ値）の精度
で測位を行うことができる。

このマルチ衛星、マルチ周波数GNSS受信機
を用いてRTKを行う場合、捕捉衛星が多いた
めこれまでのRTK-GPSシステムで基準局から
移動局へ補正データを送信していた通信機では
捕捉した衛星分すべての補正データを送ること
ができない。また、ドローンではLTEなどの
携帯電話は補正信号を送信するのに最適ではあ
るが、電波法上利用できない。よって、国内で
利用できる無線機の中から最適なものをカスタ
マイズして利用している。

3. 飛行の仕組み

RTK-GNSSを用いた高精度自動離着陸・航行
ドローンの測位系の概要を第5図に示す。ド
ローンを飛行させたい場所にGNSS基準局を設
置し、GNSS基準局からドローン搭載のGNSS移
動局に対して補正データ（RTCM）を送信する。
ドローンではフライトコントローラーにRTK-
GNSSでの測位結果を入力、また飛行させたい
コース設定値を入力する。



第5図 測位系概要

以下、自動飛行までの手順を説明する。

① 基準局設置

GNSS基準局を天空視界の開けた場所に設置
する。この基準局は電源ONをすると、国土地
理院の電子基準点を利用したVRSサービスに
接続し、基準局自身の座標を求める。おおよそ
1分程度で座標が求まる。精度は2cm程度であ
る。

自身の座標が求まると自動的にVRSを切断
し補正データ（RTCM）の配信が開始される。

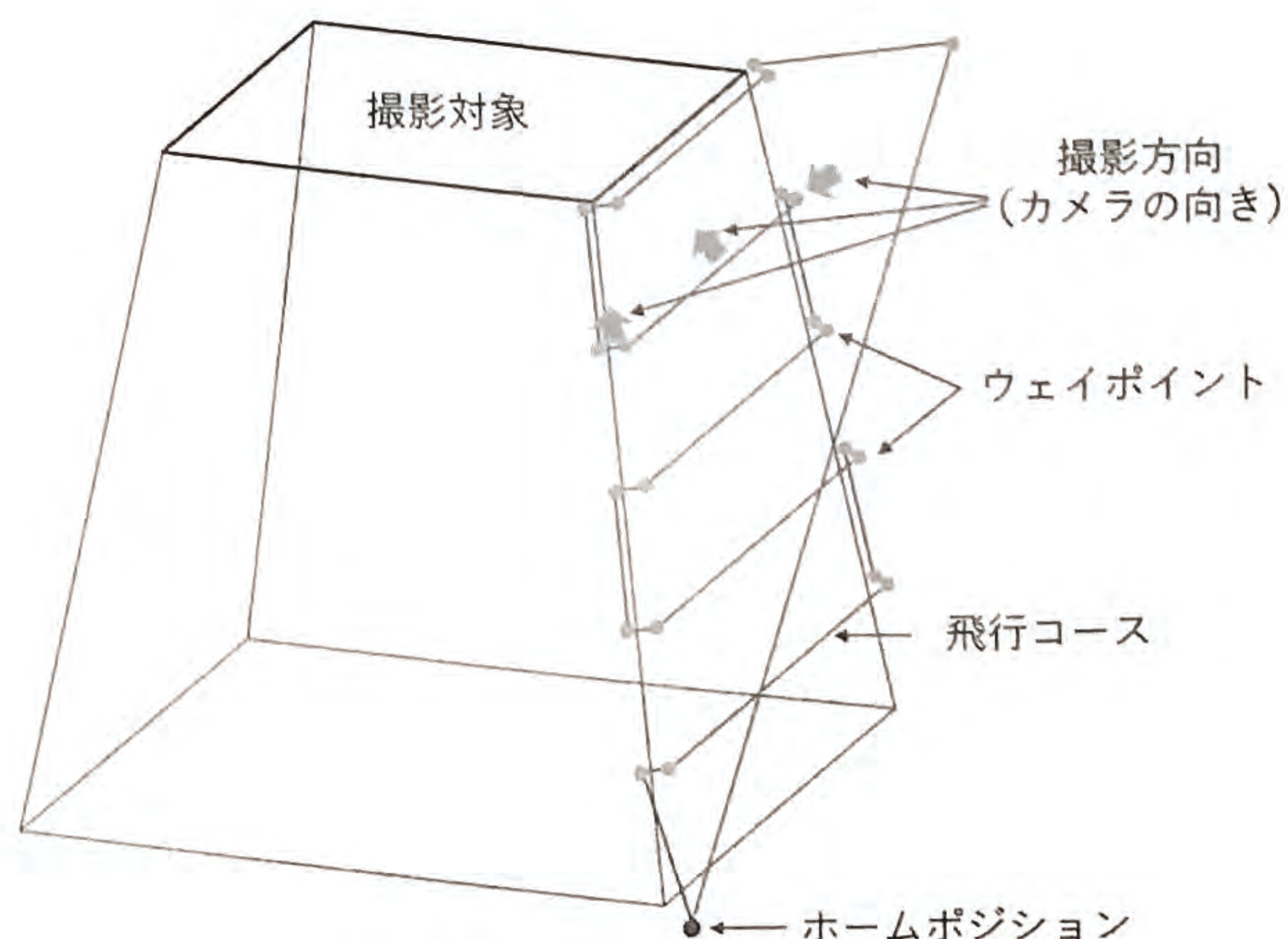
補正データは通信機を介してドローンに搭
載されたGNSS移動局に伝送される。ドローン
搭載GNSS移動局は補正データと自らが受信し
たGNSS衛星からの電波で測位計算を行い、数
mm精度の測位を行う。測位結果はフライトコ
ントローラーに入力される。

② 撮影対象物測量

飛行コースは平面直角座標系（公共座標系）
で指定するので、撮影を行う対象物の座標を求
める。GNSS受信機を利用して求めるのが効率
的であるが、この時、ドローン用に設置した基
準局から補正データをもらうようにすると、よ
り高精度のコース設定が可能となる

③ コース設計

撮影対象物の座標から飛行コースを設定す
る。撮影したい範囲がコースに入るようにウェ
イポイントを設定し、オーバーラップ率、サイ



第6図 飛行コース設計

ドロップ率を考慮に入れて飛行コースを設定する。この時、カメラの向きも撮影対象物に正対するようにドローンの向きも設定する。さらにシャッター間隔から飛行速度も設定する。第6図において黄色がウェイポイント、赤線が飛行コースを示す。

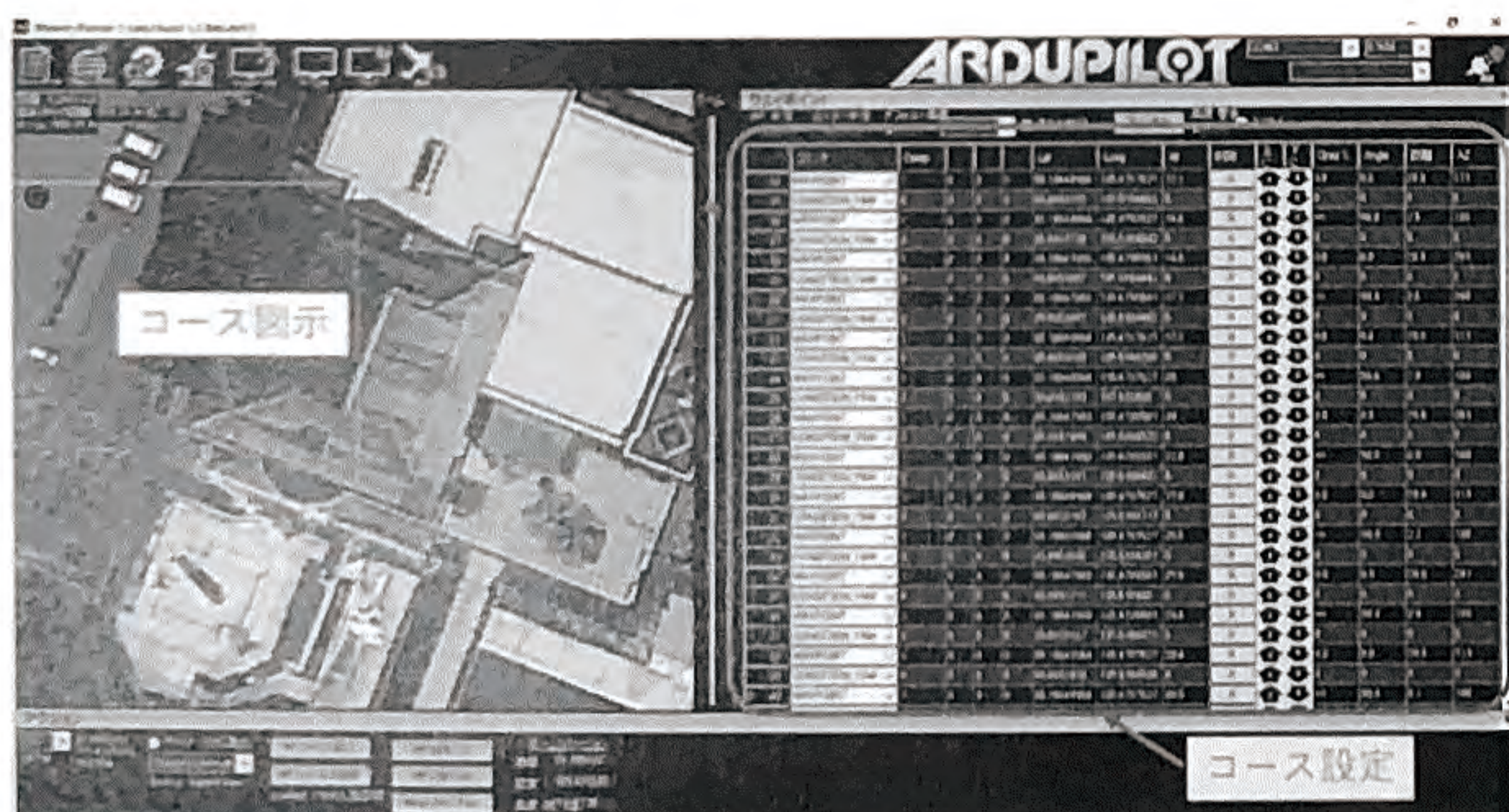
最初にドローンが止まっている場所（ホームポジション）から1番目のウェイポイントに向かうコースおよび、最後のウェイポイントからホームポジションに着陸へのコースは撮影対象物以外の物に衝突しないように注意する必要がある。

④ ドローン機体確認

ドローンの機体を点検する。ネジのゆるみや配線関係のチェックを行う。また、電池の容量確認等も行う。

さらにGNSS移動局がRTK-FIX（補正データを利用して正確な測位ができている状態）を確認する。

飛行に問題がないと確認できたら、飛行ルートを入力を行う。GCS（Ground Control Station：例はMission Planner）を用いて飛行コースを設定すると、モニター上に航空写真に飛行コースが重畳されたものが表示されるので大きな間違いがないか確認できる（第7図）。



第7図 ArduPilotでのコース設定

その後、再度安全確認したあと飛行をスタートさせる。

以上の操作によりドローンは設定された飛行コースをスピードおよび向きを指定された値に

従って飛行する。GPS、Glonass、GallileoおよびBeidouを捕捉しているため、斜面や壁際など天空の見通しが180°程度隠されても捕捉衛星数が確保できるので測位が可能である。

ドローンの飛行高度はGNSSにより測位している。従って着陸時に精密な高さでコントロールができるため安定して着陸ができる。

おおよその飛行精度はドローン中心で数cmである。ただし、着陸時はドローンが発生する自身の風により揺れるため15cm程度の範囲に拡大する例が見られた。

4. 活用

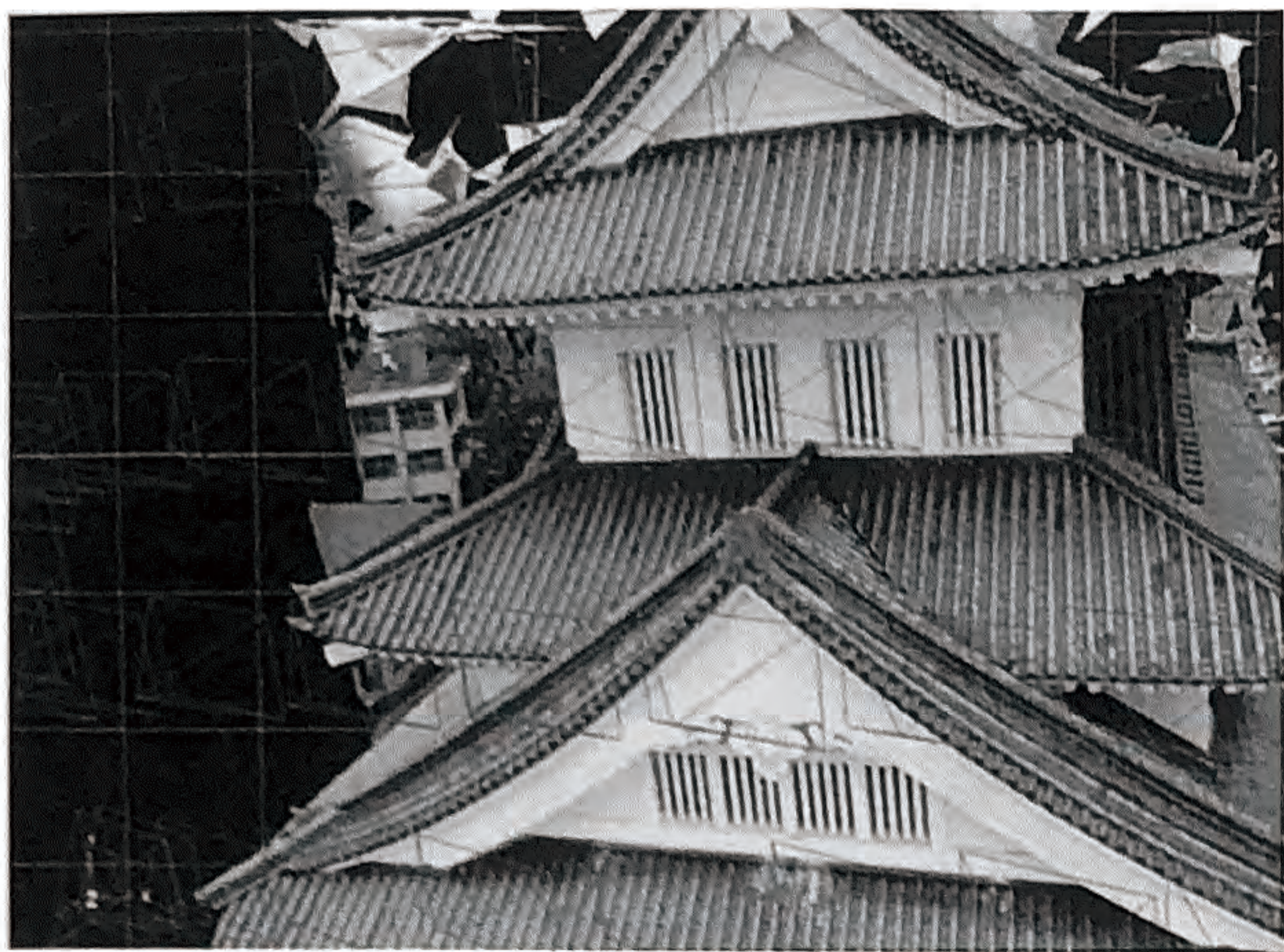
本ドローンを業務にて利用した結果を記述する。

写真1は構造物の3Dモデル作成に利用した際のドローンの飛行の様子である。この場合、張り出した庇の部分とその上下と高さを合わせて飛行することで、凹凸のある構造物の隅々まで撮影できる。



写真1 ドローン飛行の様子

第8図は撮影した写真から生成した3Dモデルである。撮影したカメラ位置を青線で示している。歪みの少ない3Dモデルができている。第9図には瓦部分を拡大したものである。細かい模様も再現されている。この飛行では対象物の最も突出した箇所から5mまで接近して撮影した。カメラのレンズ焦点距離は20mmである。

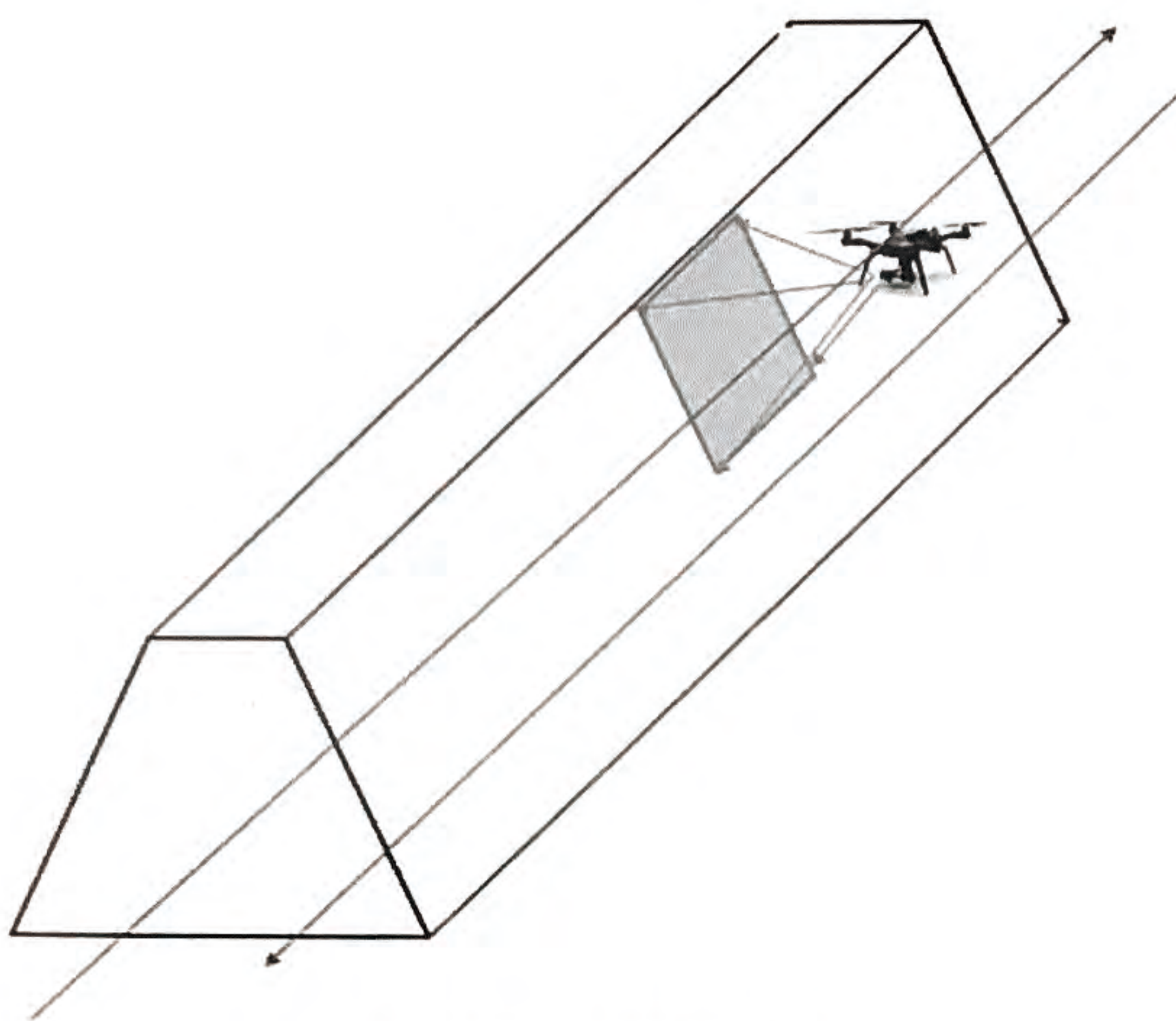


第8図 ドローン写真より構成した3Dモデル



第9図 瓦部分拡大(3Dモデル)

第10図はこのドローンの別の活用方法を示したものである。堤防やダムのようなコンクリート構造物等のひび割れ検査である。構造物の座標が判っていれば、その構成面の法線方向の距



第10図 ひび割れ撮影

離を一定に保ちつつ正対して写真撮影を行うことが可能である。距離が判っているのでカメラ諸元と合わせて写真のスケールファクタを計算でき、撮影されたひび割れ幅を求めることができる。

写真画像からはAIを用いての自動ひび割れ検出技術が発展し、実用化レベルまでになっている。

このドローンによる撮影と自動ひび割れ検出を組み合わせることにより効率の良い管理の実現が期待できる。

いずれの用途においても、インフラ点検という意味では経年変化の調査が重要である。この自動航行ドローンでは毎回同一のコースデータを入力することで、同一の位置座標からの撮影が可能である。従って経年変化を調査する場合に特に有利に作用する。

5. おわりに：今後の展開

現在はGNSS環境における高精度自動離着陸・航行ドローンを開発し、その性能の範囲で運用を行っている。次の段階としては、このドローンに近接センサーを取り付け、万が一飛行コースに突起物などがあった場合の回避行動を組み込む予定である。

また、非GNSS環境での精密自動航行ドローンについても開発を行う予定である。

【謝辞】

GNSSによる高精度自動離着陸・航行ドローンの開発にあたり(株)エーピーシステム殿には実運用、使用した際の改善点指摘などいただきました。また、(株)イデオモータロボティックス殿には最新のパーツ情報および部品供給頂きました。ここに感謝申し上げます。

筆者紹介

西川 啓一

i システムリサーチ(株)

代表取締役

＜主なる業務歴および資格＞

S57/4/1、三菱電機(株)入社。H10

/12/20、高精度GPSシステム研究。

H21/1/23、京都大学にて博士号取得。

H25/3/25、i システムリサーチ設立。

H29/11/1、代表取締役に就任。現在に至る。

＜会社の主な事業内容＞

H25年設立。インフラ点検のための3D点群による(空間・差分・変位等解析) および、3Dモデル作成のための計測装置開発。GNSSによる測位システムおよび通信装置開発。



三輪 昌史

徳島大学

大学院社会産業理工学研究部

准教授

＜主なる業務歴および資格＞

2000年頃からマルチコプタ、シングルロータ、固定翼機、VTOLなどの無人航空機の制御や運用に関数研究に従事。

日本機械学会、日本航空宇宙学会正会員

＜会社の主な事業内容＞

国立大学法人徳島大学。理工学部、総合科学部、医学部、歯学部、薬学部と大学院から構成されている。



荒木 寿徳

(株)アース・アナライザー

代表取締役

＜会社の主な事業内容＞

H30年7月設立のスタートアップ企業で、i-construction及びBIM/CIMを活用する工事で建設会社から依頼を受け、3Dモデル作成やドローンやレーザースキャナを使った3次元計測を主体とする業務を行っている。

