

ステレオカメラ深度推定技術を用いたドローンの 衝突回避機構に対する錯視画像の影響評価

河岡 諒^{1,a)} 海老根 佑雅^{1,b)} 森 達哉^{1,2,3,c)}

概要：自律飛行を行うドローンはカメラによる視覚情報に基づき周囲の環境を認識し、障害物を回避する機構を備えている。本研究では、環境認識技術の一つであるステレオカメラを用いた深度推定技術を対象とし、錯視画像が深度推定技術に与える影響をシミュレーション、および商用のステレオカメラを用いて評価する。また、意図的に設置された錯視が、ドローンの衝突回避機構に対してどのような影響を及ぼすかをシミュレータを用いて検証する。評価の結果、トリックアートのような錯視画像がステレオ深度推定の誤認識を引き起こすことを明らかにした。また、ステレオ深度推定の誤りがドローンの衝突回避機構に影響を与え、障害物に衝突するリスクが存在することを確認した。

キーワード：ドローン、ステレオ深度推定、障害物回避、錯視画像

Evaluation of the effect of optical illusion images on drone collision avoidance mechanism using stereo camera depth estimation

RYO KAWAOKA^{1,a)} YUGA EBINE^{1,b)} TATSUYA MORI^{1,2,3,c)}

Abstract: In this study, we examine the impact of illusionary images on depth estimation technology using stereo cameras in autonomous drones. These drones rely on visual information to perceive their environment and avoid obstacles. We simulate and evaluate how illusionary images affect depth estimation using commercially available stereo cameras. Additionally, we simulate the influence of intentionally placed illusions on the drone's collision avoidance mechanism. Our results show that illusionary images, such as trick art, can lead to misperception in stereo depth estimation, which in turn affects the collision avoidance mechanism, increasing the risk of the drone colliding with obstacles.

Keywords: drone, Stereo depth estimation, obstacle avoidance, visual illusions

1. はじめに

技術の進歩に伴い、無人航空機 (UAV, ドローン) の利用が急速に拡大しており、その用途は物流・農業・警備・災害対策と多岐にわたっている。現在、世界中にて実証実験やサービスの提供が始まりつつある。各国にてドローン飛行に関する法規制の緩和やサービスの認可も進んでおり、

近い将来ドローンが空を飛び回る日々が訪れることが予想される。日本においても有人地帯での目視外飛行実現に向けて規制緩和がされつつある [1]。一方で、墜落による危険性や犯罪等へ利用される例もあり問題視されている [2]。

多くのサービスでは設定された目的地までの飛行を自動的に行う自動操縦機能が利用されているが、自動操縦ではセンサ類を用いた知覚により環境認識や経路計画、障害物回避が行われている。一般により多くのセンサ類を用いることで認識精度や信頼性は向上するが、特にドローンでは自動運転車などに比べて積載重量の制限が厳しいため [3] 限られたセンサを用いて飛行を行う必要がある。空中を飛行するドローンにとって周囲の環境を距離の意味で認識す

¹ 早稲田大学/Waseda University

² 国立研究開発法人情報通信研究機構/NICT

³ 理化学研究所 革新知能統合研究 (AIP) センター/RIKEN AIP

a) k-hsw119@nsl.cs.waseda.ac.jp

b) yuga082815@akane.waseda.jp

c) mori@nsl.cs.waseda.ac.jp

ることは障害物回避や安全な飛行のために重要であるが、先述の制限のために専用のセンサではなくカメラの画像を用いて深度推定が行われることが考えられる [4].

ドローンにおけるステレオ深度推定に対するセキュリティ上の研究は存在するが、トリックアート等の錯視画像のステレオ深度推定への影響に関する研究は存在せず、システムがどのように応答するかは明らかでない。そこで、本研究ではドローンにおけるステレオカメラを用いた深度推定技術について、特に錯視画像の影響に関して調査並びに評価を行う。オープンソースのフライトコントローラであるPX4 [5] と、ロボット開発で広く使用されるROS とのシームレスな統合やリアルな物理シミュレーションが可能なシミュレータであるGazebo[6]を利用して、錯視画像のステレオ深度推定への影響を明らかにし、その影響に対してドローンの障害物回避機構がどのように反応するかを明らかにする。

評価の結果、トリックアートのような錯視画像がステレオ深度推定の誤認識を引き起こすことが判明し、また、ステレオ深度推定の誤りがドローンの衝突回避機構の作動に影響を与え、障害物に衝突してしまう場合があることが明らかとなった。錯視画像のステレオ深度推定への影響として、シミュレータを利用した評価により、立方体オブジェクトのサイズが一辺2mの場合は距離が2mを超えたときに距離の認識誤りが発生し、立方体オブジェクトのサイズが一辺20mの場合は距離が4mを超えた時点で距離の認識誤りが発生することが確認された。ドローンの衝突回避機構に対する影響として、1辺が20mの立方体オブジェクトへ錯視画像を適用した場合に衝突回避機構のコストパラメーターが1.0であるとドローンがオブジェクトに衝突してしまうことが確認された。

2. 背景

2.1 ステレオカメラを利用した深度推定

ステレオカメラを利用すると視差を利用して、深度を推定することができる。この手法による深度推定をステレオ深度推定 (Stereo Depth Estimation) と呼ぶ。この方法では位置を左右にずらした2台のカメラ画像に対してより近い物体が2つの画像上でより大きくずれて写るという特徴を利用した推定方法である。測距ではLiDARを用いることもあるが、ドローンでは積載重量の上限の問題から多数のセンサを搭載することが難しく、カメラを利用して深度推定を行うことが一般的である。

視差を用いた深度推定の方法の概要図を図1に示す。図中で左右のカメラを O, O' 、カメラ間の距離を B 、カメラの焦点距離を f で表している。 X を左右のスクリーン上(画像内)で同一となる点、そのスクリーン上(画像内)での位置を x, x' とする。このとき、視差 $d = x - x'$ は

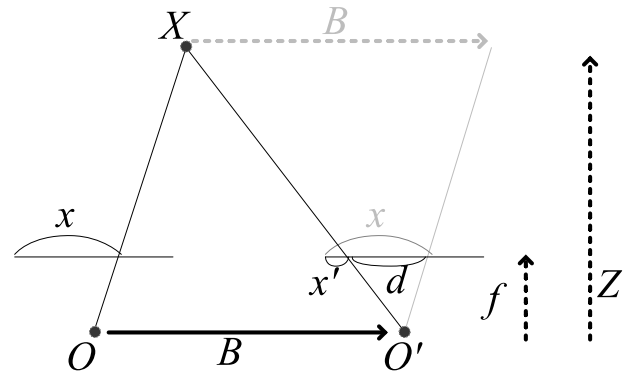


図1: ステレオ深度推定

$$d = x - x' = B \times \frac{f}{Z}$$

と表される。この式で、 B, f は既知の変数であるため、視差 d を求めることによりカメラと X との距離、すなわち深度 Z を推定することができる。視差 d は左右の画像において対応点のマッチングを行うことで算出する。

2.2 PX4

ドローン業界全体に渡るシステム全体をカバーするオープンソースプロジェクト/標準化団体としてDronecode Foundation [7]がある。Dronecode Foundationはドローンや広くはUnmanned Aerial Vehicle (UAV)にまつわる多数のオープンソースプロジェクトの基盤となっており、UAV向けのソフトウェア/ハードウェアに加え、通信プロトコルや管制コントロールまでの多岐に渡るコンポーネントが存在する。PX4 [5]はDronecode FoundationのサポートするUAV向けのオープンソースのフライトコントローラである。フライトコントローラとは、センサ等の値と今の目標値をもとに、モーター等の制御信号を出力するもので、制御に関する頭脳的な部分である。PX4を動かすための環境としてHitL (Hardware in the Loop)とSitL (Software in the Loop)がある。HitLでは、物理的なデバイスの上でPX4を動かすものであり製品のひとつとしてPixhawkがある。SitLでは、PX4の動作環境がコンピュータ上でソフトウェア的に再現されたものであり物理的なデバイスなしにPX4を動作させることができる。

シミュレーションを利用することで、仮想的にドローンを飛ばしてセンサ値や飛行時の情報を取得することができる。PX4とシミュレーションを組み合わせることでフライトコントローラやドローンの性能評価の実施が容易になる。PX4をHitLとして利用すればハードウェアの性能評価をドローンを飛ばすことなく実施することができ、PX4をSitLで利用すればコンピュータに完結した状態でドローン飛行の評価を実施することができる。PX4に対応したシミュレータはjMAVSim, AirSim, Gazebo, FlightGearなど多数存在する。

本研究では、PX4をSitLで利用し、シミュレータには

Gazebo を採用して実験を行った。

2.3 PX4-Avoidance

PX4-Avoidance [8] は深度センサフュージョンと障害物回避のために ROS ノードとしてパッケージ化された PX4 のコンピュータビジョンアルゴリズムを含むプロジェクトであり、PX4 によって提供されている。このプロジェクトには local_planner, global_planner, safe_landing_planner という 3 つの異なる実装が含まれている。local_planner は、3DVFH*ベースのプランナーであり、深度推定の結果を利用して、VFH(Vector Field Histogram) ベースのプランニングを行う global_planner は、octomap を利用して占有グリッドを作成することによってプランニングを行うグローバルなグラフベースのプランナーである。safe_landing_planner は、着陸するのに安全なエリアを見つけるためのローカルプランナーである。

本研究では、local_planner を利用してドローンの障害物回避機構に対する評価を実施した。

3. 基礎評価

まず、基礎評価として、距離に対する錯視画像の有効性の検証する。実験はシミュレータを利用した場合と商用のステレオカメラを利用した場合で実施した。シミュレータでの実験では、シミュレータとして Gazebo [6] を利用し、ステレオ深度推定のアルゴリズムとして SGBM (Semi Global Block Matching) を OpenCV の提供するものを使用し利用した。商用のステレオカメラでの実験では ZED カメラを利用し、付属の深度推定ソフトを利用した。

3.1 シミュレータを利用した評価方法

Gazebo 内に錯視画像をテクスチャとした立方体のオブジェクトを配置する。ドローンの高さを立方体のオブジェクトの高さの半分に、左右の位置を立方体のオブジェクトの中心に固定する。ドローンと立方体のオブジェクトとの間の距離を 1m から 10m まで 1m 刻みで変化させることで錯視画像の深度への影響とオブジェクトまでの距離との関係の評価した。錯視画像用のテクスチャとして 2 種類、無害なテクスチャとして 1 種類を用意し、立方体のオブジェクトは 1 辺 2m のものと 1 辺 20m のものに対して評価した。使用したテクスチャについて図 2 に示す。また、シミュレーションによる評価中の様子を図 3 に示す。

3.2 シミュレータを利用した評価結果

3.1 節で説明した手法によりシミュレーションを行い、深度推定結果を収集した。結果をもとに、オブジェクト部分の深度推定のうち、カメラからの距離が最も遠い点を利用して錯視画像の影響を行う。ここで、精度向上のため深度推定結果に対して、最も遠いものから 0.1% は外れ値・ノ

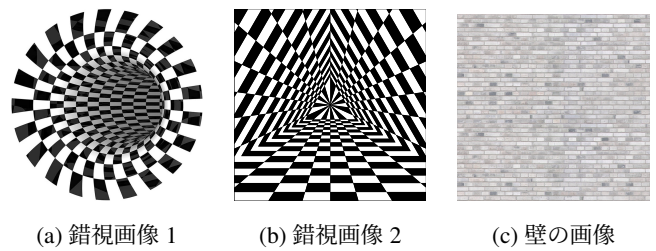


図 2: 使用したテクスチャ

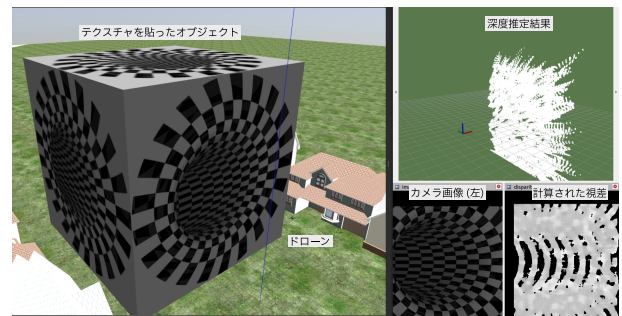


図 3: シミュレーションによる錯視画像の深度への影響評価

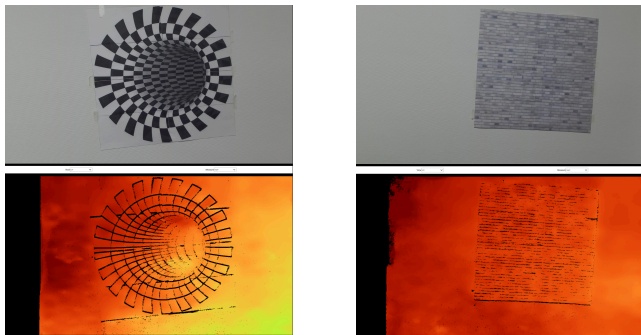
イズとして除去した。今回の実験環境では、 400×400 の大きさで深度推定を実施したため、この作業により最大で上位 160 点 (160000×0.001) が取り除かれる。また、深度推定がなされなかった部分については無視した。実験結果を表 1 に示す。結果から、オブジェクトのサイズが 2m の場合は距離が 1m の場合はテクスチャごとの違いは見られないが、2m より大きい場合は錯視画像 1 において距離の認識誤りが発生していることがわかる。壁の画像の場合は 4m の距離までは正しく認識できていることから、錯視画像を利用することで距離の誤認識が発生していると考えられる。また、オブジェクトのサイズが 20m の場合は、壁の画像を用いると距離が 10m の場合以外は距離が正しく認識できている。一方で、錯視画像を利用したものでは、距離が 4m を越えると誤認識が発生していることが確認できる。

3.3 商用のステレオカメラでの評価

錯視画像の現実での影響度を評価するために、商用のステレオカメラである ZED ステレオカメラを利用して深度推定を実施した。現実での実験の都合上、テクスチャは $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ のサイズに印刷し壁に貼ったのちにそれをステレオカメラで読み取ることで実験を行った。読み取りは ZED SDK 付属の ZED Depth Viewer を利用して実施した。実験結果のうち、錯視画像 1 の場合と壁の画像の場合について図 4 に示す。実験の結果から、錯視画像 1 と錯視画像 2 の場合は壁よりも深い位置に深度点が確認された。一方で、壁の画像を利用した場合は壁よりも深い位置に深度点は確認されなかった。図 4 において、錯視画像 1 の場合は中心に周囲とは違う色の部分が存在するのに対して、壁の

表 1: オブジェクトとカメラの距離と深度推定結果 (単位:m)

オブジェクトの サイズ	距離	錯視画像 1	錯視画像 2	壁の画像
2.0	10.0	16.684608	16.684608	17.796915
2.0	9.0	17.796915	16.684608	16.684608
2.0	8.0	16.684608	13.347686	16.684608
2.0	7.0	19.068123	14.050196	19.068123
2.0	6.0	15.703160	13.347686	13.347686
2.0	5.0	16.684608	12.712082	17.796915
2.0	4.0	14.050196	8.342304	4.305705
2.0	3.0	14.830763	13.347686	2.870470
2.0	2.0	8.611410	1.893289	1.853845
2.0	1.0	0.834230	0.826482	0.808951
20.0	10.0	16.684608	17.796915	12.712082
20.0	9.0	16.684608	16.684608	9.534061
20.0	8.0	14.050196	15.703160	8.611410
20.0	7.0	8.611410	8.898458	8.089507
20.0	6.0	8.611410	15.703160	6.208226
20.0	5.0	8.089507	5.679866	5.561536
20.0	4.0	5.133726	5.036863	4.237361
20.0	3.0	3.379161	3.295725	2.933558
20.0	2.0	1.934447	1.934447	1.879956
20.0	1.0	0.831632	0.836846	0.834230



(a) 錯視画像 1 (b) 壁の画像

図 4: ZED カメラによる深度推定

画像の場合は全体が同一色であることから確認できる。

4. ドローンの衝突回避機構に対する評価

4.1 実験セットアップ

錯視画像のドローン制御への影響を知るために、シミュレーションによる評価を実施した。フライトコントローラとしてPX4をSitLで利用し、シミュレータとしてGazeboを利用した。ステレオカメラを利用したドローンの制御機構として、PX4-Avoidanceのlocal_plannerを対象に、錯視画像が障害物回避機構に対して与える影響を調査する。

Gazebo内に錯視画像をテクスチャとした立方体のオブジェクトを配置する。ドローンをそのオブジェクトの5mの距離を置いて正面で中心の位置に配置し、PX4-Avoidanceのlocal_plannerによる障害物回避機構を有効にした状態で、

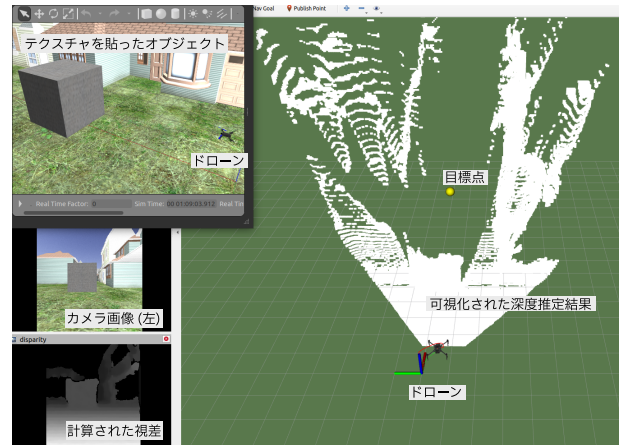


図 5: 錯視画像の衝突回避機構への影響評価の様子

オブジェクトの5m後方を目標地点として飛行を実施した。

local_plannerでは障害物回避を行うにあたり、“障害物との安全マージン”と“目標地点に対して直線方向から逸脱しない”との間のトレードオフを調整するための“obstacle_cost_param.”というパラメータ(以降、コストパラメータと表記する)が存在する。このパラメータはデフォルトでは5.0に設定されているが、ドローンの用途によって値は調整されると考えられる。このパラメータは小さいほど直線的な経路に従うように調整され、大きいほど周囲の障害物との安全マージンを多くとって飛行するように調整される。したがって、素早さの要求されるドローンの用途では小さい値が設定され、安全性の優先されるドローンの用途では大きな値が設定されると考えられる。今回はこのパラメータを1.0から9.5まで0.5刻みで値を調整して実験を行った。

4.2 結果

シミュレーションの結果得られたドローンの飛行経路をコストパラメータごとにプロットした。1辺が2mの場合の結果については図6に、1辺が20mの場合の結果については図7に示す。

1辺が2mの場合の結果から、オブジェクトに衝突することはなくドローンは飛行したことがわかる。また、コストパラメータが小さい場合はオブジェクトの横を通過しているのに対し、コストパラメータが大きい場合は徐々にオブジェクトの上を通過するように飛行した。これは、コストパラメータが大きくなるにつれて、より物体とオブジェクトとの距離を取るために高度を上げて飛行したためと考えられる。

1辺が20mの場合の結果から、コストパラメータが1.0の場合に視差画像1を利用するとオブジェクトに衝突していることわかる。これは、視差画像によってドローンの認識する距離にズレが発生しオブジェクトに接近しすぎたことで回避できず衝突したためと考えられる。1辺が2mの

場合と異なりドローンがオブジェクトの上部を通過していないが、これは、オブジェクトが大きいため高度を上げて飛行することができなかつたためだと考えられる。コストパラメータを大きくすると、オブジェクトとの距離をより大きく取るように飛行していることもわかる。

5. 議論

5.1 衝突回避機構の考察

衝突回避機構への影響評価においてコストパラメータが1.0で20mの物体に錯視画像1を適用した場合にドローンがオブジェクトに衝突した。この衝突は図7の飛行経路からもわかるように深度の誤推定によりドローンがオブジェクトに近づきすぎたため回避をすることができなかつたことに起因すると考えられる。ただし、衝突はコストパラメータを極端に小さな値に設定した場合に発生した。そこで、ドローンの飛行経路を事前に調査し、錯視画像などの深度の誤推定につながる物体が存在する場合はコストパラメータを少し大きな値に設定し安全マージンを多く取ることで衝突を回避することができると考えられる。一方で、コストパラメータを大きくすることで最短の経路からは遠くなり飛行時間は増加してしまうことには注意したい。

5.2 防御技術に向けて

本研究がターゲットとした深度推定技術は視差に基づいて動作するため、錯視画像による深度の誤認識は本質的に抑制が困難な課題である。この問題を解決するためには、視差を利用しないアルゴリズムの導入や、LiDARや、レーダー、超音波などの視差に影響を受けないセンサの搭載が有効である。これにより、周囲の物体との距離を正確に測定し、衝突の可能性がある場合には緊急停止や緊急着陸を行うことで、衝突を回避することができると期待される。ただし、追加のセンサを使用する場合は、ドローンの積載制限を考慮する必要がある点に留意する必要がある。

5.3 今後の課題

実機での評価 ドローンの衝突回避機構への実験はシミュレータを用いて実施した。錯視画像を利用した場合にドローンがどのような飛行経路を取るかについては明らかになっていない。特にドローンは飛行中に環境の影響を受けカメラから得られる画像が安定しないことに加えて、明るさなどの周辺環境の影響により深度推定自体がシミュレータと同様に行われるかについて調査する必要がある。

他の錯視画像や深度推定アルゴリズム トリックアートのような錯視画像として本研究では2種類の錯視画像を利用して評価を行った。基礎評価や衝突回避機構に対する実験で明らかとなったように利用する錯視画像によってもステレオ深度推定への影響度は異なっている。よって、深度推定技術に対してより誤認識を引き起こす錯視画像の探索

は今後の課題である。また、実験ではPX4-Avoidanceに標準で利用されている深度推定アルゴリズムを利用した。このアルゴリズムは古典的なものであり、近年提案されている機械学習を利用した深度推定などの異なるアルゴリズムを利用した推定技術に対しても効果があるかについて調査する必要がある。

単眼カメラによる深度推定 カメラ画像を利用した深度推定ではステレオカメラではなく単眼カメラによって得られた画像をもとに深度推定を行う技術もある。特にドローンの文脈では積載量の問題からカメラが1台で深度推定が可能な単眼深度推定は利用される可能性が高い。本研究で注目したものは視差を利用して誤認識を引き起こすものであったため、単眼深度推定に対する影響は不明である。錯視画像の単眼深度推定への影響評価や単眼深度推定に誤認識を引き起こされる入力に対する探索も今後の課題である。

6. 関連研究

錯視画像のステレオカメラに対する影響評価についての研究としては野平らによる研究[9]がある。彼らは錯視画像としてステレオグラムを対象として評価を行っており、生成したステレオグラムをディスプレイに表示させ、それをステレオカメラで読み取ることにより実験を行った。実験の結果、平面であるはずのディスプレイ上に窪みが存在するとステレオカメラが認識したことを確認し、錯視画像を利用した距離偽装が可能なことを実証した。本研究ではステレオグラムではなくトリックアートとしての錯視画像に対して評価を実施し、ドローンの文脈で分析を行った。

ドローン自体への攻撃はいくつか存在している[10],[11],[12]。Sonら[10]はドローンに対する初のセンサ攻撃を調査しており、ジャイロスコープの共振周波数で音波を注入することでDoS攻撃を実証している。Wangら[11]はジャイロスコープの共振周波数付近の超音波を注入することによりドローンの回転翼の回転速度を変化させることで商用ドローンに対するDoS攻撃を実施した。Drewら[12]はドローン下部に搭載されたオプティカルフローセンサをスプーフィングすることでドローンに対する連続的な制御を初めて実証した。

ドローンに搭載されたステレオカメラへの攻撃評価として、Zhouらの考案したDouble Star[13]がある。Double Starは強い光をカメラに当てることでレンズに発生するフレア効果を利用して偽の深度点をステレオ深度推定結果に注入する攻撃である。彼らはシミュレーションでの実験に加え、DJI製のドローンを利用した実機を用いた実験も実施している。偽のマッチングに利用する特徴点を2種類と攻撃手法3種類を組み合わせた6種類の攻撃を評価し、攻撃方法を組み合わせるこよにより0.5mから16mの距離として認識される偽の深度点を注入させることに成功した。本研究では攻撃的な入力ではなく、一般の街中に存在しう

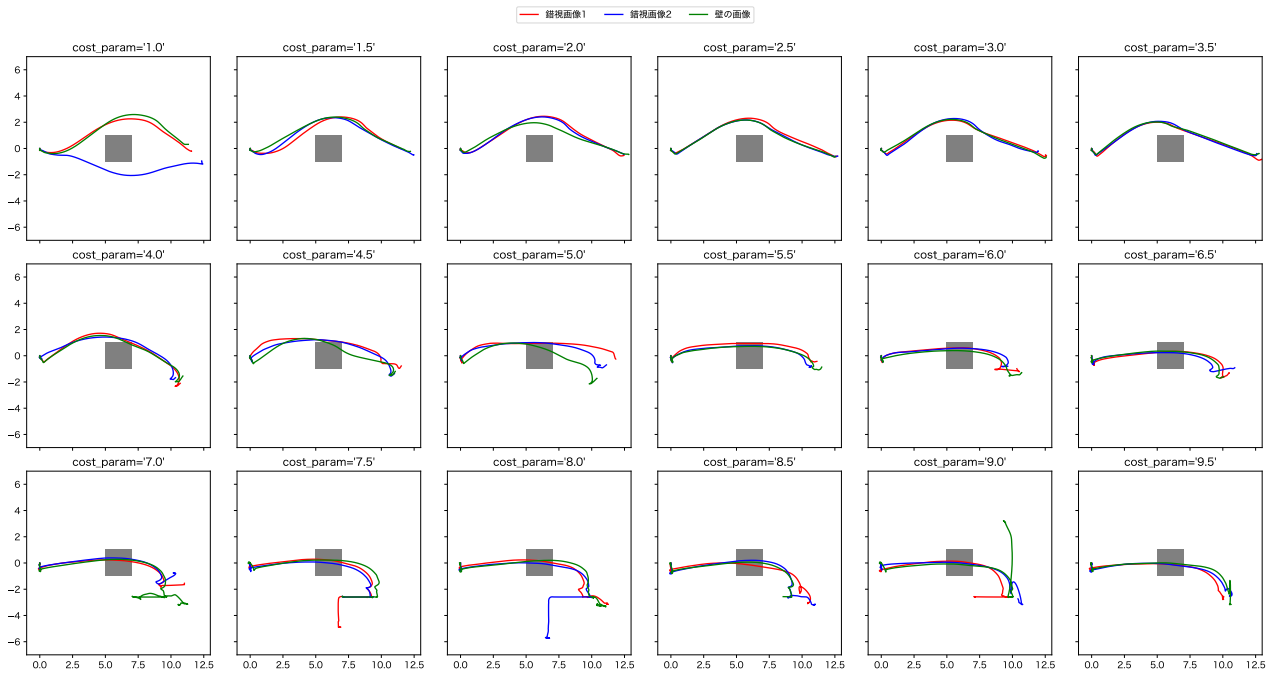


図 6: ドローンの飛行経路 (1 辺が 2m の場合)

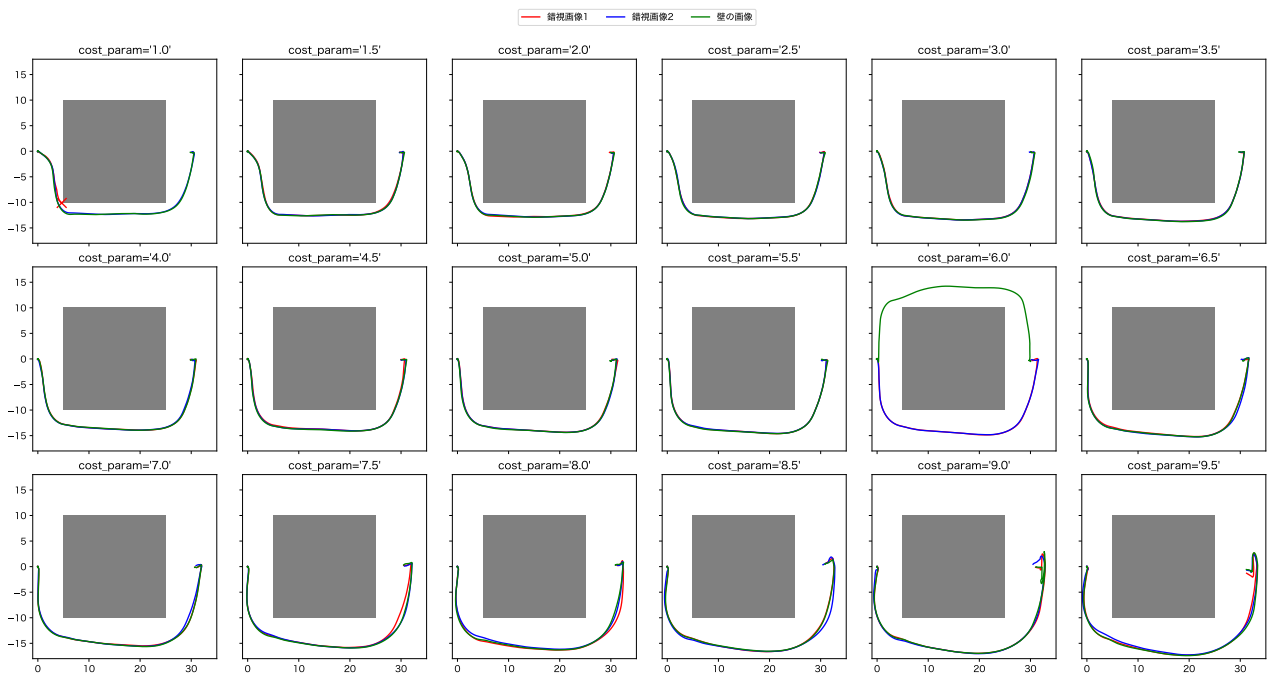


図 7: ドローンの飛行経路 (1 辺が 20m の場合)

るトリックアートとしての錯視画像に対して深度推定への影響評価を実施した。

カメラを利用する自律システムに対する研究として、大山ら [14] による研究がある。彼らはカメラを利用した物体認識システムへの攻撃方法の一つである幻影攻撃 (Phantom Attack) に注目し、評価と対策を実施した。YOLOv3 を物体認識システムとして搭載したドローンに対して、プロジェクターを利用し、さまざまな距離や角度で定量的な評価を実施することで幻影攻撃の有効性を明らかにした。また、幻影攻撃への対策として、深層学習を利用して本物の物体と幻影を区別するシステムである DeGhost を考案し、対策の有効性を検証した。

7. まとめ

ステレオカメラ深度推定を利用したドローンの衝突回避機構に対して、錯視画像の影響を評価した。基礎的な評価の結果、トリックアートなどの錯視画像がステレオカメラを利用した深度推定に対して誤認識を引き起こすことがシミュレータ上で確認された。また、商用のステレオカメラを利用した実世界での認識においても誤認識が発生することも確認された。また、ドローンを利用した衝突回避機構に対する評価では、オープンソースの PX4 とその衝突回避モジュールである PX4-Avoidance の local_planner に対して実験を行い、深度の誤推定がドローンの飛行経路に影響を与えることを明らかにした。特に、コストパラメータが小さい場合にドローンが衝突回避ができず障害物に衝突することも確認した。ドローンの自律飛行を行うにあたっては経路を事前に調査し、深度推定に影響を与える物体がある場合はパラメータの調整に注意する必要がある。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 22H00519, JST CREST JPMJCR23M4 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 国土交通省: 物流の DX による最適化に向けて, <https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/content/001716111.pdf> (2024).
- [2] Department of Homeland Security: Drone Popularity and Potential Risk Soars, S&T Prepares, <https://www.dhs.gov/science-and-technology/news/2021/07/16/feature-article-drone-popularity-and-potential-risk-soars-st-prepares> (2021).
- [3] 国土交通省: 諸外国の第三者上空の飛行に関する規制動向, <https://www.mlit.go.jp/common/001269584.pdf> (2018).
- [4] DIGITAL MEDIA PROFESSIONALS INC.: 当社 AI 認識モデルの産業用ドローンへの応用 / Introduction of AI Recognition Model for Industrial Drones, <https://www.dmprof.com/blog/%E5%BD%93%E7%A4%BEa%E8%AA%8D%E8%AD%98%E3%83%A2%E3%83%87%E3%83%AB%E3%81%AE%E7%94%A3%E6%A5%AD%E7%94%A8%E3%83%89%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%B3%E3%81%B8%E3%81%AE%E5%BF%9C%E7%94%A8-introduction-of-ai-recog/> (2021).
- [5] PX4: PX4 Autopilot - Open Source Autopilot for Drones,

- <https://px4.io/> (2021).
- [6] Robotics, O.: Gazebo - Simulate before you build, <https://gazebo.org/> (2016).
- [7] Dronecode Project, I.: Dronecode Foundation - setting the standards in the drone industry with open-source, <https://www.dronecode.org/> (2021).
- [8] PX4: PX4-Avoidance - Obstacle Detection and Avoidance, <https://github.com/PX4/PX4-Avoidance> (2016).
- [9] 野平浩生, 岩田康志, 吉田直樹, 藤本大介, 松本勉: ステレオカメラの計測セキュリティに関する考察, 電子情報通信学会 2018 年暗号と情報セキュリティシンポジウム SCIS2018 (2018).
- [10] Son, Y., Shin, H., Kim, D., Park, Y., Noh, J., Choi, K., Choi, J. and Kim, Y.: Rocking Drones with Intentional Sound Noise on Gyroscopic Sensors, *Proceedings of the 24th USENIX Conference on Security Symposium*, USENIX Association (2015).
- [11] Wang, Z., Wang, K., Yang, B., Li, S. and Pan, A.: Sonic Gun to Smart Devices: Your Devices Lose Control Under Ultrasound/Sound, *Black Hat USA* (2017).
- [12] Davidson, D., Wu, H., Jelinek, R., Ristenpart, T. and Singh, V.: Controlling UAVs with Sensor Input Spoofing Attacks, USENIX Association (2016).
- [13] Zhou, C., Yan, Q., Shi, Y. and Sun, L.: DoubleStar: Long-Range Attack Towards Depth Estimation based Obstacle Avoidance in Autonomous Systems, *USENIX Security Symposium* (2022).
- [14] Hotaka Oyama, Ryo Iijima, T. M.: DeGhost: Unmasking Phantom Intrusions in Autonomous Recognition Systems, *IEEE European Symposium on Security and Privacy* (2024).