

複数台 LiDAR と複数 UAV を用いた 人物追従システムに関する研究

令和 2 年度

大阪市立大学大学院工学研究科
電子情報系専攻 前期博士課程

蒔 田 大 悟

概要

カメラ画像を利用して人物の追従を行う研究が多数行われており、監視などのセキュリティに関する用途、災害が発生した際の救助活動、スポーツ観戦など様々な分野に向けての応用が期待される。

そこで我々は、サッカーのような限られた領域で活動する複数の人物を、地上に複数の固定したレーザ測域センサ (LiDAR) と複数の UAV を用いて空中から撮影するシステムを提案する。昨年度まで行っていた先行研究では、LiDAR から得られる点群情報から人物の位置推定を行い、UAV に搭載されたカメラから得られる画像データを解析することで人物が着用しているビブスの背番号を読み取り人物の特定を行う。それらを組み合わせて固定 LiDAR からはオクルージョンや移動できないといった理由で捉えきれない人物を UAV で撮影した画像から補完し、正確な移動軌跡の導出を行っていた。

本研究では、より移動軌跡の補完を正確なものにするために、UAV がオクルージョン範囲にいる人物を優先的に撮影するシステムを考える。また LiDAR を複数に増設するために必要なシステムについても述べる

目次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	3
第 2 章	地上固定 LiDAR と複数 UAV を用いた撮影計画の概要	4
2.1	はじめに	4
2.2	撮影ベクトルと移動カメラの撮影領域	4
2.2.1	撮影ベクトル	4
2.2.2	要求解像度	5
2.2.3	撮影領域の導出	6
2.2.4	カメラの高さや向きを考慮した撮影領域の算出	7
2.2.5	1 人の撮影人物に対して設定する撮影ベクトルの本数	8
2.3	UAV の目標位置の導出	9
2.3.1	グリッドマップと目標位置	9
2.4	先行研究の課題点と本章のまとめ	11
第 3 章	複数 LiDAR の位置校正方法とオクルージョン範囲を考慮した撮影計画	12
3.1	はじめに	12
3.2	複数 LiDAR の位置決定方法	12

3.2.1	RTK-GPS 測位	13
3.2.2	RTK-GPS 測位と単独測位の比較	14
3.3	GPS 座標から map 座標への変換	14
3.4	オクルージョンが発生した場合の UAV の撮影位置の決定	15
3.4.1	1 台の LiDAR に対するオクルージョンの範囲	15
3.5	複数 LiDAR での人物認識	18
3.5.1	重複人物のマージ方法	20
3.6	本章のまとめ	21
第 4 章	実環境におけるシステム構築	22
4.1	はじめに	22
4.2	Robot OperationSystem の概要	22
4.3	ROS による UAV 制御	23
4.4	地上設置 LiDAR と GPS センサ	24
4.5	本章のまとめ	28
第 5 章	実環境における評価実験	30
5.1	はじめに	30
5.2	実験設定	30
5.2.1	ダミーを配置した場合の撮影計画	31
5.2.2	LiDAR を 2 台用いたマージの実機実験	31
5.3	スロープ型の地形でのシミュレーション	32
5.4	本章のまとめ	32
第 6 章	結論	34
6.1	まとめ	34
6.2	課題と展望	34
	参考文献	37

図目次

1.1	Proposed Monitoring System	3
2.1	Model of Shooting Vector	5
2.2	Shooting Area of One Target Person	8
2.3	Grid Map and Shooting Vector (a)	10
2.4	Grid Map and Shooting Vector (b)	10
3.1	Image of RTK-GPS Positioning System	13
3.2	Single GPS Positioning (right) and RTK-GPS Positioning (left)	14
3.3	Occlusion Area	16
3.4	Dummy Position	17
3.5	Example of Person Recognition	18
3.6	Person recognized by LiDAR1 or LiDAR2	19
3.7	Distance of Two Circle	20
4.1	Mavic Mini	24
4.2	UTM-30LX-EW	25
4.3	UST-30LX	25
4.4	Multi-band GNSS Antenna ANN-MB-01	26
4.5	Wireless Communication Model for LiDAR and GPS antenna	27
4.6	Communication System	29

5.1	Handball Court and Baseball Ground in Osaka City University	31
5.2	Experiment Environment	32

表目次

第 1 章

緒言

1.1 研究背景

カメラ画像を利用して人物を追従する様々な研究が行われており、監視などのセキュリティの用途、災害などの救助活動、スポーツ観戦のような娯楽の用途など様々な分野向けの応用が期待される．西川らは、グラフ最適化アルゴリズムに基づく複数のカメラを使用した多人数トラッキングシステムを開発し、人物の追跡精度や計算時間を評価をしている．[1,2].

カメラ自身が撮影対象に応じて移動することによって、画角の制限がなくなり撮影できる範囲が拡大するため、オクルージョンなどの理由で撮影対象を見失う可能性が減少し、人物の追従精度の向上が考えられる．主に移動カメラのプラットフォームとして利用されていたものとして、カメラを搭載した UAV が挙げられる．Teuliere らは、画像の色のヒストグラムの類似度を利用して、地上の撮影対象を 1 台の UAV で追従し、撮影対象がオクルージョンにより見えなくなった場合でも、パーティクルフィルタを用いて撮影対象を見失わないようにしている [3]. Bethke らは、地上の撮影対象に対して複数の UAV を使用して追従し、それぞれの UAV の位置情報と UAV が撮影した画像から、撮影対象の正確な位置と速度の推定を行っている [4]. Naseer らは、正面と上面 2 台のカメラを取り付けた UAV を使用して

人物の追従をしており、正面を向けたカメラで人物とジェスチャーの認識、上面に搭載したカメラで天井に設置した AR マーカの認識による UAV の位置推定を行っている [5]. Price らは、小型無人飛行機に搭載された PC 上でリアルタイムで動作する信頼性の高い人物認識のためのニューラルネットワークを構築し、そのニューラルネットワークを利用した複数の小型無人飛行機での人物追従を行っている [6]. Wang らは、複数の UAV を用いたビジョンベースによる搜索・救助システムを提案しており、UAV 間の通信を維持しながら搜索領域をより大きくするための UAV の経路を計画している [7].

カメラ以外を利用した人物追従に関する研究も多数存在する、Bajracharya らは、地上を移動するレーザ測域センサ (LiDAR) を搭載したロボットを使用し、LiDAR から取得した点群情報から歩行者の認識と追従を行う [8]. また古川らは、UAV を利用して海上で遭難した人物を救助することを想定し、再帰的ベイズ推定で人物の移動位置の推定を行い、推定された位置に UAV を移動させることによって人物の追従を行っている [9, 10]. 複数の移動物体を複数の UAV で追従する研究に関しては、Pack らが、信号を発信させ続けいている追従対象人物から信号を取得し、その信号に基づいて複数の UAV を制御している [11].

それらの研究背景を踏まえ先行研究として佐々木らは、Fig. 1.1 のように、地上に設置された LiDAR と UAV に搭載されたカメラを協調させることによって、地上で活動している複数人物をモニタリングするシステムを提案している [12]. 提案されたシステムとしては LiDAR から得られる情報から人物の位置位置検出を行い、そのデータから UAV の目標位置を導出した. また、UAV が撮影した画僧から人物を特定しオクルージョンなどにより地上の LiDAR から認識できない人物の移動軌跡を補完するシステムを構築した.

1.2 研究目的

佐々木らの行った先行研究では様々な課題点が存在した. 例として LiDAR が 1 台のみだと人物の移動範囲が小さく制限されてしまうことがあげられる. また人物の追従の精度を向上させるためには、LiDAR が捉えた人物を撮影するための撮影計画でなく LiDAR が捉えられない範囲を撮影するための UAV の位置移動が望ましい.

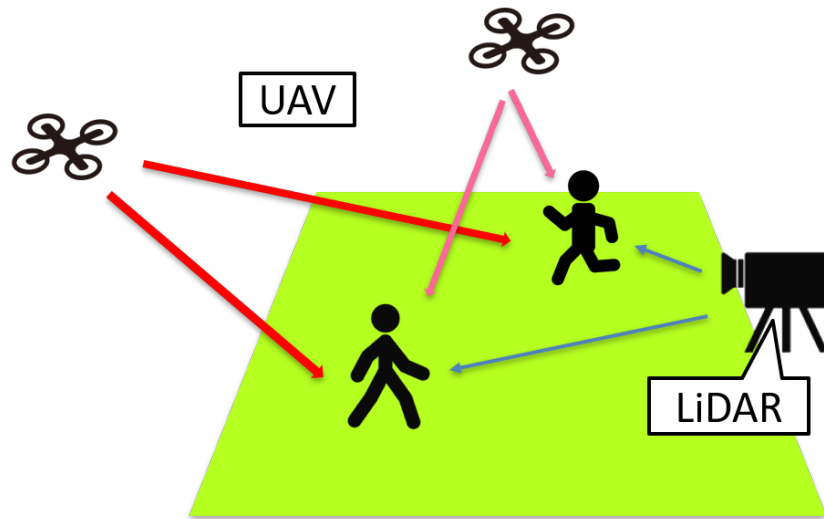


Fig. 1.1 Proposed Monitoring System

そこで我々は地上固定 LiDAR を増設するための手法の提案を行う．またオクルージョンが発生した際に，地上から捉えられない範囲を考慮しその領域を UAV が撮影できるための手法の提案を行う．

1.3 本論文の構成

本論文の構成は，次のようになっている．まず本章において，本研究の背景・目的などを述べた．2 章では，昨年度まで行っていた先行研究についての概要とその問題点，課題点などについて述べる．3 章では，LiDAR を複数台使用するための手法の提案とオクルージョンが起こった場合の撮影計画の補完方法について述べる．4 章では，実際に実験を行う際に構築したシステムについて述べる．5 章では，実機実験の結果について述べその結果に対する考察を行う．6 章では，まとめと本研究についての課題と展望について述べる．

第 2 章

地上固定 LiDAR と複数 UAV

を用いた撮影計画の概要

2.1 はじめに

本章では，昨年度まで佐々木らが行っていた地上固定 LiDAR と複数 UAV を用いた撮影計画の概要について述べる．[12] またその研究における問題点，課題点などについて述べる．

2.2 撮影ベクトルと移動カメラの撮影領域

2.2.1 撮影ベクトル

カメラで撮影対象を撮影するとき，撮影対象の表面に対して垂直な方向から撮影することが望ましい．撮影対象の表面に垂直な方向を撮影ベクトルと定義する．また定義した撮影ベクトルに対して，一定の解像度以上で撮影できる領域を撮影領域と定義する．要求解像度と UAV に搭載されている移動カメラの性能から撮影領域は計算できる．

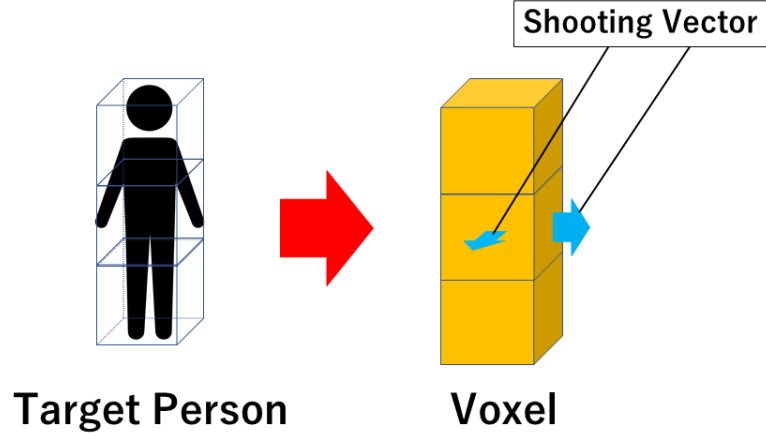


Fig. 2.1 Model of Shooting Vector

撮影領域の導出において、三次元空間および二次元空間はグリッドによって分割され、それぞれボクセル、セルとして管理される。Fig. 2.1 は撮影対象人物とその人物に対するボクセルと撮影ベクトルである。この研究では Fig. 2.1 で中心のセルから撮影ベクトルが表されているように、簡単のため、対象人物をは 1 つのボクセル内で存在するものとし、その 1 つのボクセルから垂直な方向に撮影ベクトルを定義する。

2.2.2 要求解像度

この研究では、1[mm] を表すために必要な画素数 [pixel/mm] で解像度を表現する。あるカメラが撮影対象を撮影しているとき、カメラの水平 (垂直) 解像度を R_{camera} 、カメラの水平 (垂直) 画角を α [rad]、撮影対象を写している水平 (垂直) 画角を β とし、セルの 1 辺の長さが S [mm] であるときの、撮影対象の解像度 R [pixel/mm] は式 (2.1) で求められる。

$$\frac{\beta R_{camera}}{\alpha S} [\text{pixel/mm}] \quad (2.1)$$

任意の要求解像度 $n[\text{pixel/mm}]$ が与えられたとき、要求解像度の満たすための条件は式 (2.1) より $n \leq R$ で表される。この式より、要求解像度を満たすためには画角 β に対して式 (2.2) を満足する必要がある。

$$\beta \leq \frac{\alpha n S}{R_{\text{camera}}} [\text{rad}] \quad (2.2)$$

以上より、ある撮影ベクトルについて要求解像度を満たす撮影領域は、条件式 (2.2) を満たす水平画角 β_h 、垂直画角 β_v の点の軌跡である。

2.2.3 撮影領域の導出

撮影領域の導出を平面について順番に導出していく。まず始めに x, y 平面について考える。撮影ベクトルが設定されたセルの中心を原点とする x, y 座標系を考える。カメラの座標を $(x, y)[\text{mm}]$ 、撮影ベクトルと x 軸のなす角を γ 、セルの 1 辺の長さを $2\lambda[\text{mm}]$ とすると水平画角 β_h はのようになる。

$$\beta_h = \left| \arctan \left(\frac{y + \lambda \cos \gamma}{x - \lambda \sin \gamma} \right) - \arctan \left(\frac{y - \lambda \cos \gamma}{x + \lambda \sin \gamma} \right) \right| \quad (2.3)$$

簡単のために $\gamma = 0$ のときを考えると、 xy 平面における水平画角 β_h で捉えることのできる点の軌跡は式 (2.4) のようになる。

$$\left(x - \frac{\lambda}{\tan \beta_h} \right)^2 + y^2 = \left(\frac{\lambda}{\tan \beta_h} \right)^2 + \lambda^2 \quad (2.4)$$

この式を極座標形式に変換すると??になる。

$$r(\phi) = \frac{\cos \phi + \sqrt{\cos^2 \phi + \tan^2 \beta_h}}{\tan \beta_h} \lambda \quad (2.5)$$

zr 平面について考える。 xy 平面の時と同様に、セルの中心を原点とする座標系を考える。

カメラの位置を z , $r(\phi)$ [mm], 撮影ベクトルと r 軸のなす角を ψ [rad], セルの 1 辺の半分の λ [mm] とする. 撮影対象を捉えている垂直画角 β_v は, 式 (2.6) のようになる.

$$\beta_v = \left| \arctan \left(\frac{z + \lambda \cos \psi}{r(\phi) - \lambda \sin \psi} \right) - \arctan \left(\frac{z - \lambda \cos \psi}{r(\phi) + \lambda \sin \psi} \right) \right| \quad (2.6)$$

xy 平面のとき同様に, \tan に変形すると, 式 (2.7) のようになる.

$$\tan \beta_v = \frac{2r(\phi)\lambda \cos \psi + 2z\lambda \sin \psi}{z^2 + r(\phi)^2 - \lambda^2} \quad (2.7)$$

簡単のために, $\psi = 0$ の時を考えると, zr 平面における撮影ベクトルを捉えるために必要な垂直画角 β_v [rad] で捉えることのできる点の軌跡は, 式 (2.8) のようになる.

$$\begin{aligned} z^2 + r(\phi)^2 + \lambda^2 &= \frac{2r(\phi)\lambda}{\tan \beta_v} \\ z^2 + \left(r(\phi) - \frac{\lambda}{\tan \beta_v} \right)^2 &= \left(\frac{\lambda}{\tan \beta_v} \right)^2 + \lambda^2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

上式を z 軸方向を θ の正とした距離 r , 角度 θ による 3 次元極座標系の式に変形し, $r(\theta, \phi)$ について解くと式 (2.9) となる.

$$r(\theta, \phi) \leq \lambda^2 \left\{ \left(\frac{\sin \theta + \sqrt{\sin^2 \theta + \tan^2 \beta_v}}{\tan \beta_v \cos \theta} - \frac{\cos \phi}{\tan \beta_h} \right)^2 + \left(\frac{\sin \phi}{\tan \beta_v} \right)^2 \right\} \quad (2.9)$$

式 (2.9) と式 (2.2) を合わせた条件を満足する位置が撮影領域である.

2.2.4 カメラの高さや向きを考慮した撮影領域の算出

この研究では UAV の高度を一定にして実験を行っている. そのときの UAV の高度を h [mm] とするとその時の式 (2.9) に課される拘束条件は式 (2.10) になる. 次にカメラのロール, ピッチ, ヨーの可動域を考える. ピッチを ω [rad] で固定した場合, ヨー, ピッチを, μ , ω [rad] とし, μ , ω , ϕ , θ およびカメラの水平画角 α_h と垂直画角 α_v に関して, 式 (2.11) の

拘束条件が課される.

$$\text{subject to } r(\theta, \phi) \cos \theta = h \quad (2.10)$$

$$\text{subject to } |\phi| \leq \mu + \frac{\alpha_h}{2}, \quad \omega - \frac{\alpha_v}{2} \leq \theta \leq \omega + \frac{\alpha_v}{2} \quad (2.11)$$

2.2.5 1 人の撮影人物に対して設定する撮影ベクトルの本数

前節では撮影ベクトルの領域の導出をしたが、その領域は 1 つの撮影ベクトルの方向のみ補完している．実際に人物認識を行うためには、対象人物の周囲の領域を全てフォローする必要がある．その条件を満たすために 1 人の人物に複数本の撮影ベクトルを付与する．1 つのセルから出る撮影ベクトルの本数が 4 本であることを考慮すると、撮影ベクトルの本数は 4 の倍数であることが望ましい．

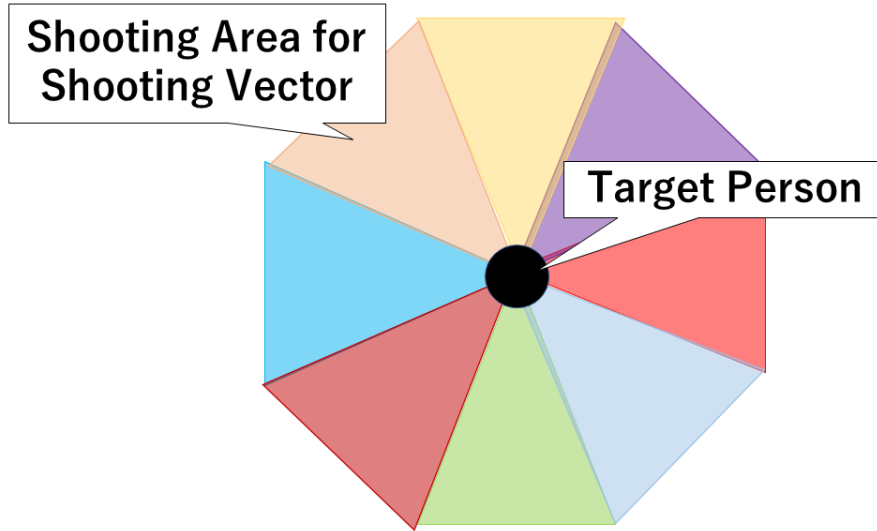


Fig. 2.2 Shooting Area of One Target Person

2.3 UAV の目標位置の導出

2.3.1 グリッドマップと目標位置

本研究では，人物移動領域と UAV 移動可能領域をグリッドマップで管理する．人物移動領域で認識された人物と前節までに導出した撮影ベクトルの領域から UAV の移動可能位置における目標位置の投票を行う．撮影人物に付与された撮影ベクトルをグリッドマップに投影し，撮影ベクトルの領域に含まれるグリッドマップのセルが UAV の目標位置になる．実際には撮影人物は複数人存在し 1 人に対して撮影ベクトルは複数本付与されているため，UAV の目標位置は撮影ベクトルがある領域のうち，撮影ベクトルがより多く重なっているセルである．

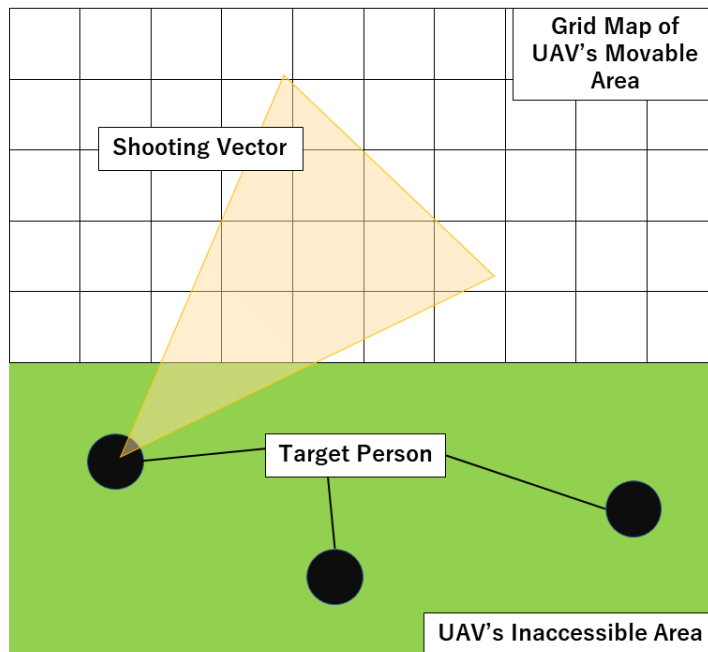


Fig. 2.3 Grid Map and Shooting Vector (a)

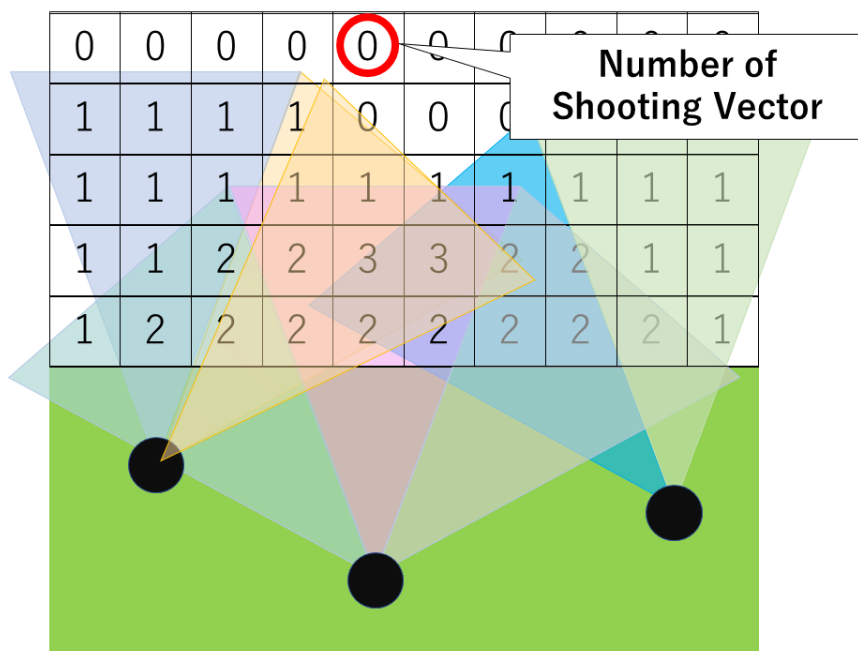


Fig. 2.4 Grid Map and Shooting Vector (b)

移動カメラが現在いる位置から次の目標位置を受け取るまでに動くことができる距離には制限がある．移動カメラの最大並進速度を $v_{max}[\text{m/s}]$ ，撮影計画の実行周期を $f_{plan}[\text{Hz}]$ とすると，1 周期内で移動カメラが移動できる最大並進距離 $d_{max}[\text{m}]$ は，式 (2.12) のようになる．

$$d_{max} = \frac{v_{max}}{f_{plan}} \quad (2.12)$$

移動カメラの現在位置を中心とし d_{max} を半径とする円が，実行周期内に UAV の移動できる領域になる．この円の中にあり撮影ベクトルが一番多く重なっているグリッドマップのセルが UAV の目標位置である．

2.4 先行研究の課題点と本章のまとめ

前節までに導出した撮影ベクトルの設定や UAV の目標位置決定の導出手法を使って UAV 撮影計画を行っていたが，実機実験では様々な問題点が発生していた．

UAV の GPS センサの精度が低く，目標位置に移動する際に実際の目標位置と UAV が到達した目標位置にずれが生じる．また LiDAR の位置情報を UAV に搭載されている GPS センサと同じものを用いて取得しているため，LiDAR が認識している人物の位置の精度が低い．LiDAR に対して撮影対象が複数人いる場合に遮蔽 (オクルージョン) が発生する．オクルージョンが発生した場合，位置情報が取得できない人物が存在するため撮影ベクトルの本数が減少し，UAV の目標位置が人物を捉えきれない位置に設定されることがある．

次章では LiDAR の精度の高い位置の決定方法とオクルージョンが発生した場合の UAV の目標位置の補完方法について述べる．

第 3 章

複数 LiDAR の位置校正方法と オクルージョン範囲を 考慮した撮影計画

3.1 はじめに

本章では，LiDAR の位置を取得するために使用した手法を説明する．また，決定した LiDAR の位置とそれが認識した人物の位置からオクルージョンが起きている範囲を導出し，その範囲を UAV が撮影できるように目標位置を設定する手法を説明する．

3.2 複数 LiDAR の位置決定方法

まず始めに，複数 LiDAR の位置の取得方法について述べる．先行研究では 1 台の LiDAR の位置を UAV に搭載している GPS センサと同じものを使用してを取得していた．しかし，

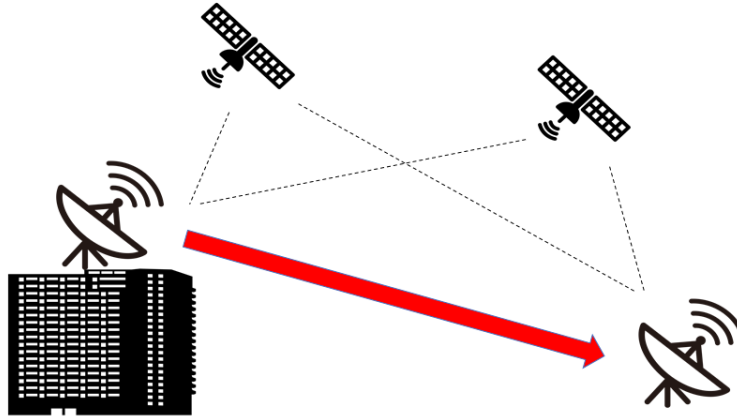


Fig. 3.1 Image of RTK-GPS Positioning System

UAV に搭載されている GPS センサから得られる緯度経度情報は数 m から十数 m の誤差がある。複数の LiDAR を使用する際、位置の誤差が大きいと、1 つの物体を 2 つの物体と誤認してしまう恐れがある。そのため、2 つの LiDAR の正確な相対位置を取得するために RTK-GPS 測位という手法を利用して位置を取得する。

3.2.1 RTK-GPS 測位

RTK-GPS(Real-Time Kinematic GPS) 測位とは、位置が分かっている移動しない基地局 (Base) と位置情報を取得しようとしている観測点である移動局 (Rover) で同時に GPS 観測を行い、基地局で観測したデータを移動局へリアルタイムに送信し、基地局の位置に基づいて移動局の位置を求める手法である。さらにネットワークを利用して基地局と移動局のデータ送信を行うことで、基地局と移動局が長距離で離れていても精度の高い演算ができる。

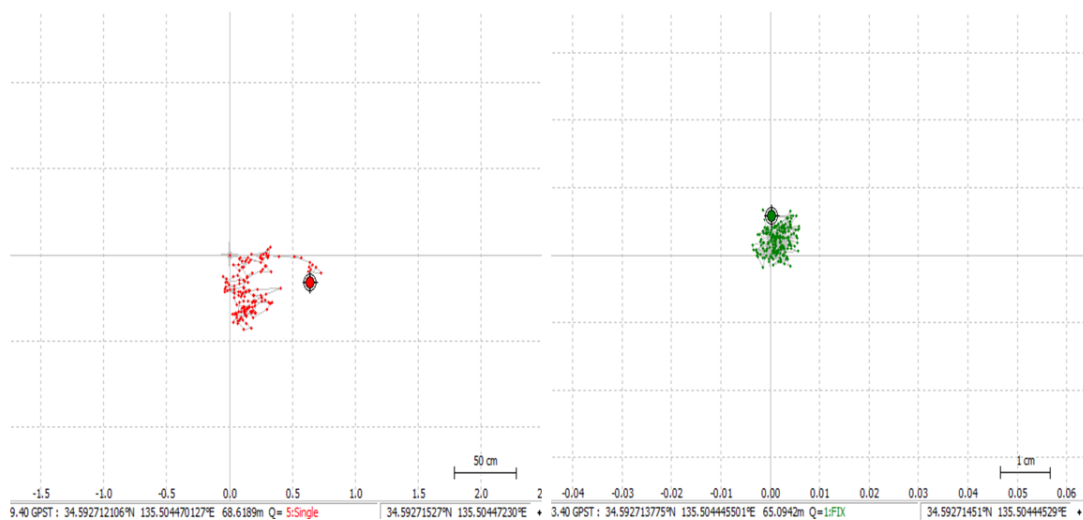


Fig. 3.2 Single GPS Positioning (right) and RTK-GPS Positioning (left)

3.2.2 RTK-GPS 測位と単独測位の比較

単独測位では数 m から十数 m の誤差が発生するのに対して，RTK-GPS 測位では数 cm の誤差が発生するといわれている．ここで，実際に計測したデータを比較して測位の性能の差を述べる．計測位置は大阪市立大学 F 棟 507 号室のベランダであり，Fig. 3.2 は 30 秒の計測データをグラフ化したものである．Fig. 3.2 左のグラフは単独測位の結果であり，グラフは 1 マス 50cm である．同図右のグラフは RTK-GPS 測位の結果であり，グラフは 1 マス 1cm である．グラフはから見て取れるように，単独測位は 50cm から 1m の誤差があり，RTK-GPS 測位の誤差は 1cm から 2cm 以内に収まっている．

3.3 GPS 座標から map 座標への変換

本研究では，東を x 座標正方向，北を y 座標正方向とする map 座標系を用いる．また座標原点は LiDAR1 の座標をもとに算出する．ここでは，GPS センサから得た LiDAR1 の緯

度経度と座標から原点の緯度経度の値の算出方法、原点の緯度経度の値と LiDAR2 の緯度経度の値から LiDAR2 の map 座標の算出方法を述べる。

LiDAR1 の GPS 座標を $lon_{lidar1}, lat_{lidar1}$, map 座標を x_{lidar1}, y_{lidar1} とすると求める map 座標原点の緯度経度の値 $lon_{origin}, lat_{origin}$ は以下の式 (3.1) で算出される。なお式中の R は地球の赤道半径である。

$$\begin{aligned} lat_{origin} &= \frac{y_{lidar1}}{R} \times \frac{180}{\pi} + lat_{lidar1} \\ lon_{origin} &= \frac{x_{lidar1}}{R} \times \frac{180}{\pi} \times \frac{1}{\cos(lat_{origin} \frac{180}{\pi})} + lon_{origin} \end{aligned} \quad (3.1)$$

式 (3.1) より得られた map 座標原点の緯度経度の値を用いて、LiDAR2 の map 座標 x_{lidar2}, y_{lidar2} を式 (3.2) 求めることができる。LiDAR2 の GPS 座標を $lon_{lidar2}, lat_{lidar2}$ とする。

$$\begin{aligned} x_{lidar2} &= R(lon_{lidar2} - lon_{origin}) \frac{\pi}{180} \cos((lat_{lidar2} - lat_{origin}) \frac{\pi}{180}) \\ y_{lidar2} &= R(lat_{lidar2} - lat_{origin}) \frac{\pi}{180} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.4 オクルージョンが発生した場合の UAV の撮影位置の決定

前節まででは、LiDAR の位置を取得するための手法を述べた。人物行動範囲内に複数人の人物が存在する場合、オクルージョンが発生し、地上設置 LiDAR では人物行動範囲内の全ての人物をとらえきれない場合が存在する。この節では、オクルージョンが発生した場合の LiDAR の撮影できない領域と、その領域を考慮した UAV の目標位置の導出方法について述べる。

3.4.1 1 台の LiDAR に対するオクルージョンの範囲

LiDAR の設置位置と人物の位置関係から LiDAR が物体を認識することのできない領域を推定することができる。この領域をオクルージョンエリアと定義する。簡単のため人物の形

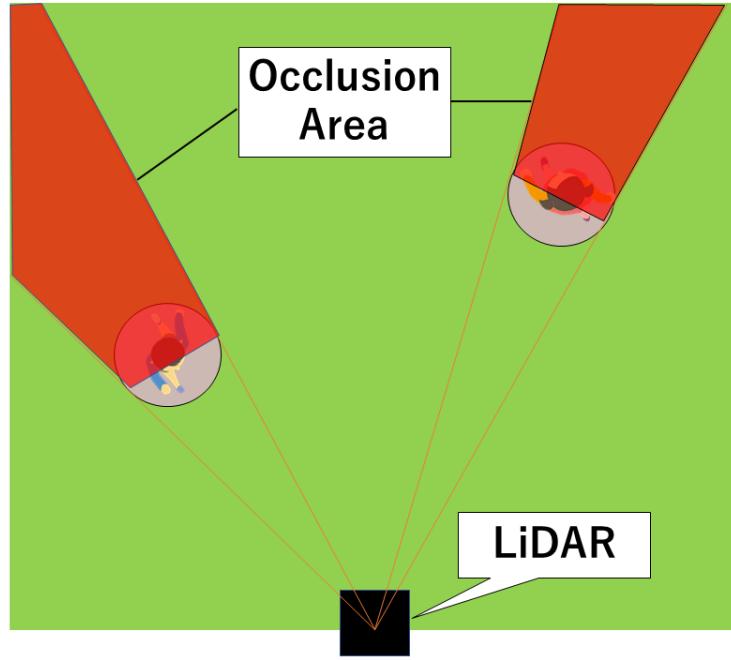


Fig. 3.3 Occlusion Area

を円形としその半径を r とすると Fig. 3.3 で示される領域がオクルージョンエリアとなる．

オクルージョンエリアは人物の円に対して LiDAR の座標を通る 2 本の接線を考え、2 接点を結んだ線と 2 本の接線、人物の移動可能範囲の境界に囲まれる領域になる．このオクルージョンエリアに人物が存在した場合、地上カメラから捉えられないため UAV が撮影する必要がある．本研究では、オクルージョンエリアに架空の人物がいると想定して撮影計画を行う．架空の人物（ダミー）の座標を設定することで、ダミーに対しても撮影ベクトルが付与されオクルージョンエリアを撮影範囲に収めることができる．

ダミーの座標の位置は、LiDAR と人物を表す円の中心座標を結ぶ直線と人物移動可能範囲の領域との交点を導出し、その交点の座標と人物の円の中心座標の midpoint に設定する．LiDAR の座標を x_{lidar}, y_{lidar} 、人物の円の中心座標を x_{person}, y_{person} とすると 2 点を結ぶ直線の方程式は式 (3.3) で求めることができる．ここでは人物移動可能領域の中心を原点とする座標系を使用する．

$$y = \frac{y_{person} - y_{lidar}}{x_{person} - x_{lidar}}x + \frac{x_{person}y_{lidar} - x_{lidar}y_{person}}{x_{person} - y_{lidar}} \quad (3.3)$$

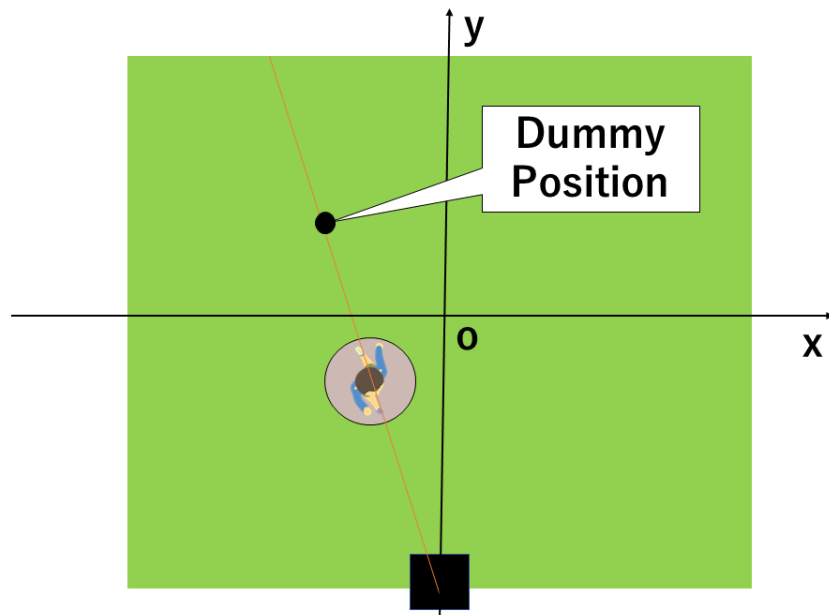


Fig. 3.4 Dummy Position

式 (3.3) の方程式より境界の座標を代入することにより交点の座標が求められる．1 人の人物に対して 1 つのダミーが生成されるためダミーを含めた人物の数は，LiDAR が認識している人物の数を n 人とする，撮影ベクトルを付与される人物とダミー人物の合計の数は $2n$ となる．

3.5 複数 LiDAR での人物認識

LiDAR を複数使用して人物認識を行う場合，それぞれの LiDAR でとらえた物体を同一の座標系に合わせる必要がある．この別々に認識された物体を 1 つの座標系にマージする際，同一人物を別の人物として捉えてしまうと unnecessary 撮影ベクトルが存在することになり効率の悪い撮影計画になる．

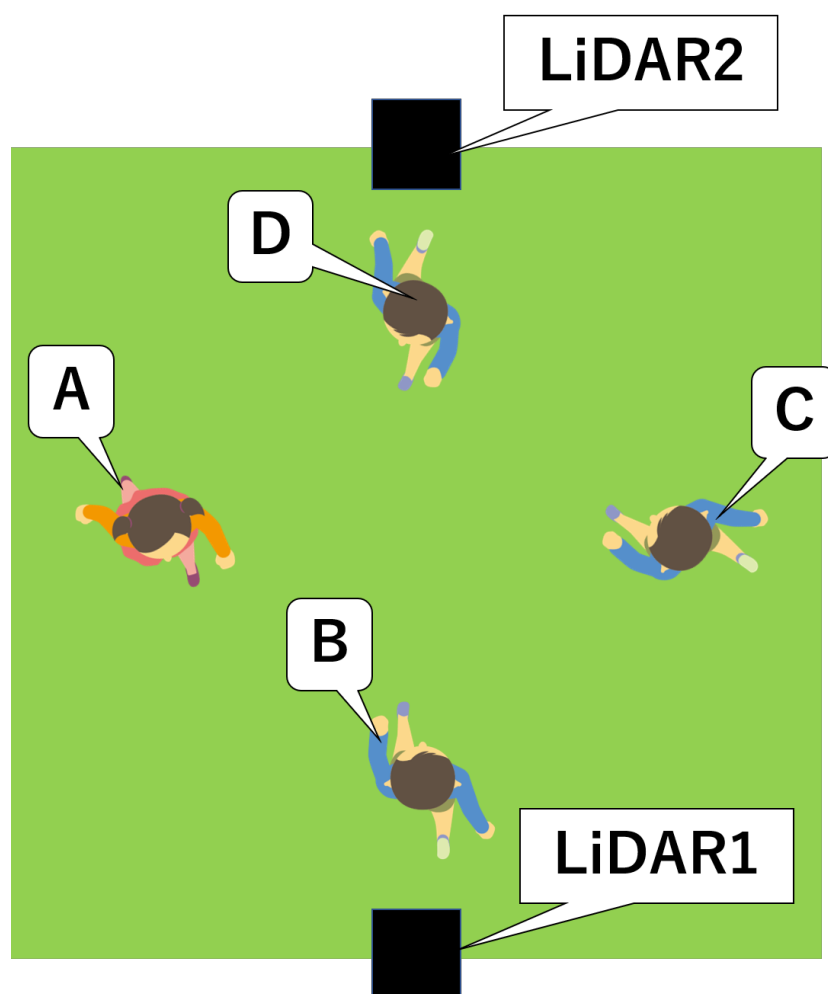


Fig. 3.5 Example of Person Recognition



(a)



(b)

Fig. 3.6 Person recognized by LiDAR1 or LiDAR2

例として Fig. 3.5 のような人物と LiDAR の配置を考える．4 人の人物それぞれに A,B,C,D のラベルを割り振る．前節で述べていたオクルージョンエリアを LiDAR1, LiDAR2 についてそれぞれ考慮すると，人物 D が LiDAR1 のオクルージョンエリアに配置されていて，人物 D が LiDAR2 のオクルージョンエリアに配置されている．人物 A,C は両方の LiDAR から認識することができる．LiDAR1 が認識できる人物を Fig. 3.6(a), LiDAR2 が認識できる人物を Fig. 3.6(b) に示す．2 つの LiDAR の認識している人物をそのままマージすると人物 A,C が重複して数えられることになる．

3.5.1 重複人物のマージ方法

2 つの LiDAR で同一人物を認識するとき，Fig. 3.5 の人物 A を例として考えると，LiDAR1 は人物 A の前面，LiDAR2 は人物 A の背面を認識することになる．この認識のずれにより，それぞれの LiDAR が認識した点群から生成される円の中心座標が完全一致する可能性は限りなく低いと考えられる．

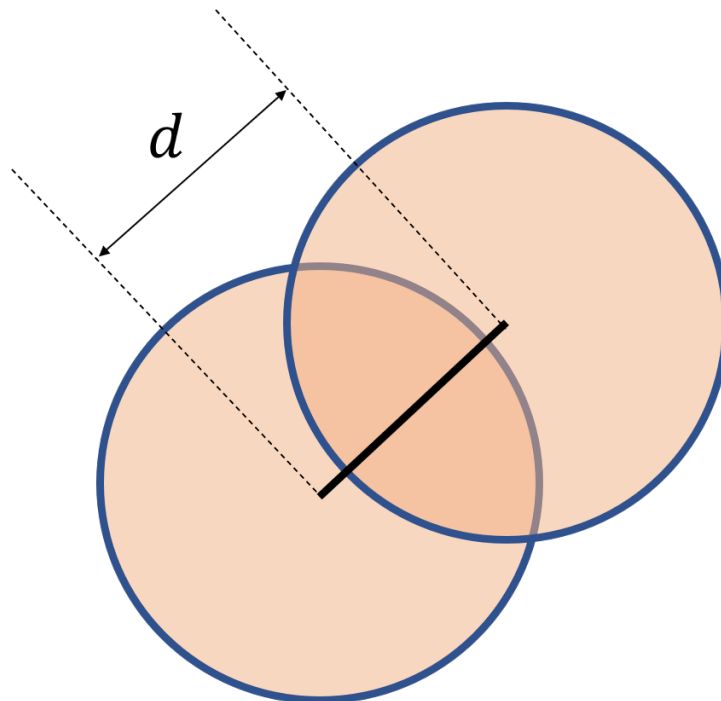


Fig. 3.7 Distance of Two Circle

Fig. 3.7 に各 LiDAR が同一の人物から認識した 2 つの円を示す. 2 つの円の中心間の距離を d とする. この中心間の距離の大きさで同一人物であるかどうかの判定を行う. 2 円が同一人物であるとする中心間の距離を d_{max} と設定すると, d が式 (3.4) を満たすとき 2 つの円は同一人物から生成された円と判定する.

$$d \leq d_{max} \tag{3.4}$$

3.6 本章のまとめ

本章では, 始めに精度の高い LiDAR の位置情報を取得するために用いた演算方法について説明した. 次にオクルージョンエリアについて言及し, そのエリアを撮影するためにダミーの人物の配置方法について述べた. 最後に 2 台の LiDAR が認識した物体のマージ方法について述べた.

次章では実機実験を行うための実際のシステムについて説明する.

第 4 章

実環境におけるシステム構築

4.1 はじめに

2 章および 3 章で説明した複数 LiDAR を用いた人物追従システムと UAV 撮影計画を実環境において構築する。本章では，今回構築したシステムに利用した開発プラットフォームおよび機器について説明する。

4.2 Robot OperationSystem の概要

本研究では，ロボット用のソフトウェアプラットフォームである Robot OperationSystem(ROS) を利用している。ROS は Ubuntu や Linux Mint などの Linux 系 OS でサポートされているミドルウェアやソフトウェアフレームワークの一種である。またロボットを動作させるためのプロセス間の通信，パッケージ管理，ソフトウェア開発に必要なツールやライブラリを提供している。ROS でサポートされている言語は主に C++ と Python であり Java や Lisp などの言語も使用できる。つづいて ROS 通信について説明する。ROS ではプログラムをノードと呼ばれる比較的小さなプログラムに細分化して実装し，そのノード間で情報をやりとりしてロボットなどの制御を行う。ノード間の通信は主に 3 種類あり，単方向非同

期通信方式のトピック通信，双方向同期通信方式のサービス通信，双方向非同期通信方式のアクション通信を利用できる．本研究ではトピック通信のみを用いているので，サービス通信，アクション通信の説明は省略する．図にトピック通信のイメージ図を示す．トピックとはノード間でやりとりするメッセージの名前であり，トピックを一定周期で配信するノードを配信者ノードと配信されたトピックを受ける購読者ノードによって通信システムは構築される．ノード実行時に ROS マスターにトピック名とメッセージの形式が登録され，購読者ノードは ROS マスター内で受信したいトピックを配信しているノードを探索し，その配信者ノードと通信を行う．本実験では，撮影計画を実行する PC（ホスト，LiDAR に接続している PC，UAV を直接制御しているタブレットに ROS を導入し，地上から UAV の制御を行う．

4.3 ROS による UAV 制御

本研究では，撮影計画を実装する UAV として，民生用ドローンおよび関連機器製造会社である DJI 社の Mavic Mini を複数台使用する．以下，MavicMini の性能の概要と制御を行うための通信モデルについて説明する．

MavicMini は GPS センサを搭載しており，フライトコントローラで自身の位置情報を管理している．昨年度まで使用していた同社が販売している Matrice600 とは異なり，ROS と直接通信ができる DJI Onboard SDK が使用できない．そのため MavicMini の制御は DJI Mobile SDK を用いて行う．DJI Mobile SDK は Android 端末，IOS 端末のアプリによりフライトコントローラと ROS の通信を可能にする API を提供する．今回の実験では Android 端末で MavicMini を制御するアプリを開発し，無線 LAN によって ROS マスターと通信を行う．図に通信モデルを示す．



Source : <https://www.dji.com/jp/mavic-mini>

Fig. 4.1 Mavic Mini

4.4 地上設置 LiDAR と GPS センサ

LiDAR はレーザ機器やセンサなどの開発を行う北陽電機株式会社の UTM-30LX-EW, 同社の UST-30LX の 2 台を使用する. 性能はどちらも検出範囲は 270[deg], 角度分解能は 0.25[deg] であり, LAN ケーブルから点群情報を送信する.

本研究では 3 章で示した通り, LiDAR の位置情報を GPS センサから取得し, map 座標を得



Source : <https://www.hokuyo-aut.co.jp/search/single.php?serial=146>

Fig. 4.2 UTM-30LX-EW



Source : <https://www.hokuyo-aut.co.jp/search/single.php?serial=195>

Fig. 4.3 UST-30LX

る．今回の実験では GPS センサは ublox 社のマルチバンド GNSS アンテナの ANN-MB-01 を使用する．



Source : <https://www.hokuyo-aut.co.jp/search/single.php?serial=146>

Fig. 4.4 Multi-band GNSS Antenna ANN-MB-01

昨年度の研究では LiDAR の情報を有線 LAN ケーブルでホスト PC に送信していたが、LiDAR を複数台使用する場合、有線 LAN ケーブルで接続するのは非常に不便であり効率が悪い．そこで、LiDAR の点群情報と GPS センサからの位置情報を無線でホスト PC に送信するシステムを構築する、LiDAR や GPS センサから直接データを無線通信することができないので、一旦ホスト PC とは別の PC に接続してその PC からホスト PC へ無線接続する．LiDAR と接続する PC (サブ PC) には Raspberry Pi4 modelB を採用した．Raspberry Pi4 は Ubuntu server OS に対応しており ROS をインストールすることができる．LiDAR をサブ PC に有線 LAN ケーブルで接続し、サブ PC 内で点群情報を ROS トピックとして配信するノードを立ち上げることでホスト PC との無線接続を可能とする．GPS 情報はサブ PC にデータを取り込んだ後、サブ PC とホスト PC で TCP 通信を行う．ホスト PC で、受け取った GPS 情報をトピックに変更するノードを立ち上げることで、LiDAR の位置情報

を UAV 撮影計画の ROS プログラム内で使用することができる。

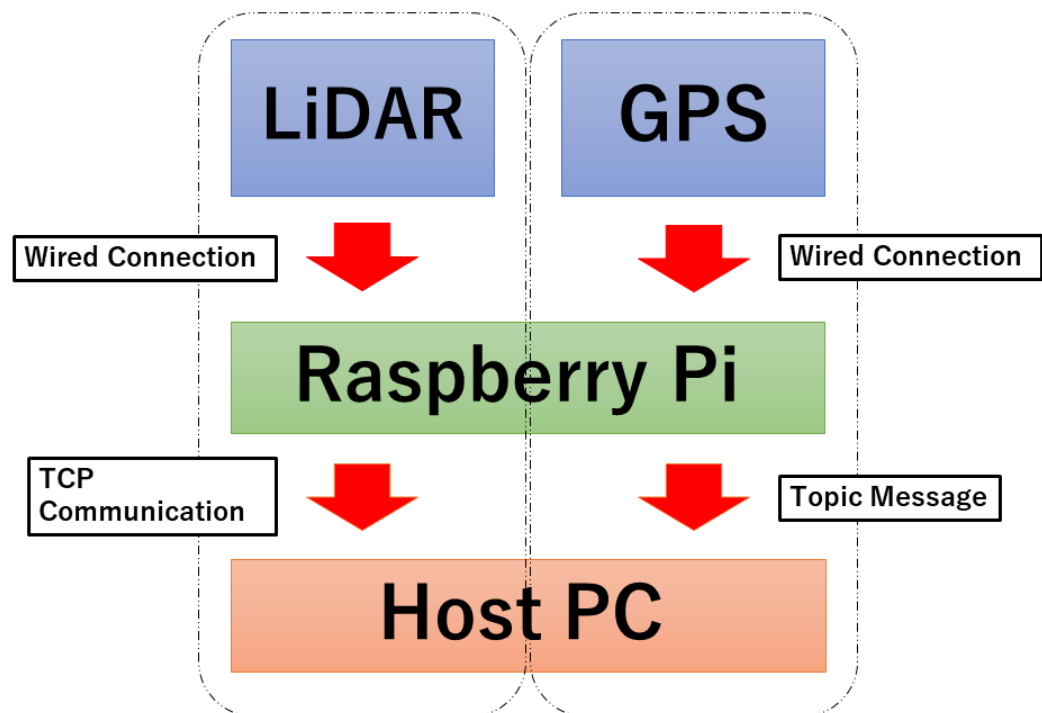


Fig. 4.5 Wireless Communication Model for LiDAR and GPS antenna

Fig. 4.5 は LiDAR 周りの通信モデルである。

Fig. 4.6 にこのシステム全体の通信モデルを示す。赤で示されている通信が無線通信であり，水色で示されている通信が有線通信である。

4.5 本章のまとめ

本章では，2 章で説明した撮影計画および人物検出，また 3 章で説明した複数台 LiDAR の設置方法およびダミー人物の設定方法を実装したシステムについて説明した．次章では，本章で説明したシステムを利用して，実環境において複数人物の追従と撮影計画を行った実験について述べる．

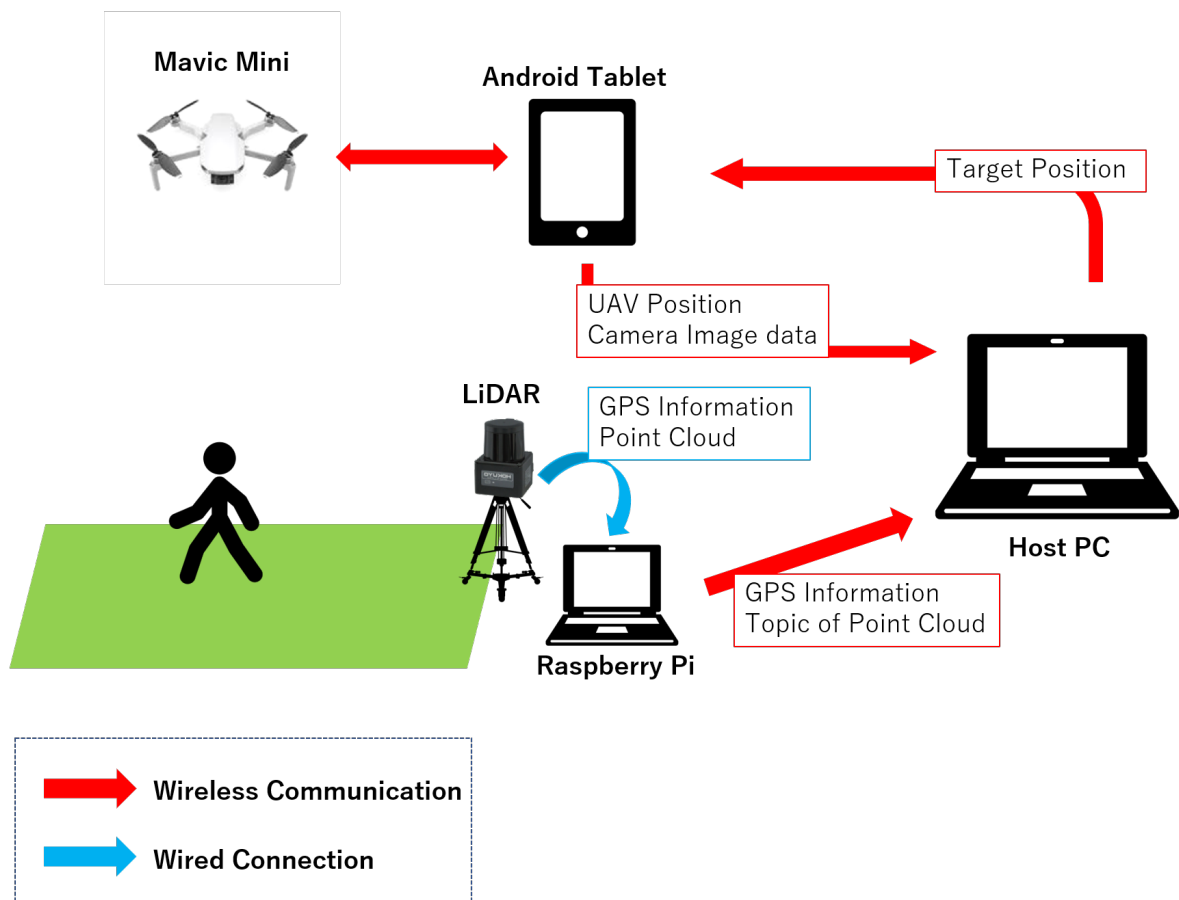


Fig. 4.6 Communication System

第 5 章

実環境における評価実験

5.1 はじめに

本章では，4 章で実装したシステムを用いて実機実験を行うための，実験設定とその結果について説明し，考察を行う．

5.2 実験設定

実機を実装した実験は 2 つ行った．1 つ目の実験は大阪市立大学の野球場，2 つ目の実験は大阪市立大学のハンドボールコートで行った．以下に 2 つの実験で共通の設定を述べる．

東を x 軸正方向，北を y 軸正方向とし $1[m]$ を軸の 1 目盛りとする map 座標系を考える．原点を中心に $10[m]$ を 1 辺の長さとして正方形の領域を人物の行動可能領域とする．その領域の東側，西側，北側，南側の辺から $10[m] \times 15[m]$ の長方形の領域を UAV の飛行範囲と設定する．基準とする LiDAR を北向きに設置しその位置を map 座標系の $(0.0, -5.0)$ と定義することで原点の座標と GPS 位置を逆算する．2 台目の LiDAR は南向きに任意の位置に置くことで原点の GPS 座標を用いて map 座標を得ることができる．

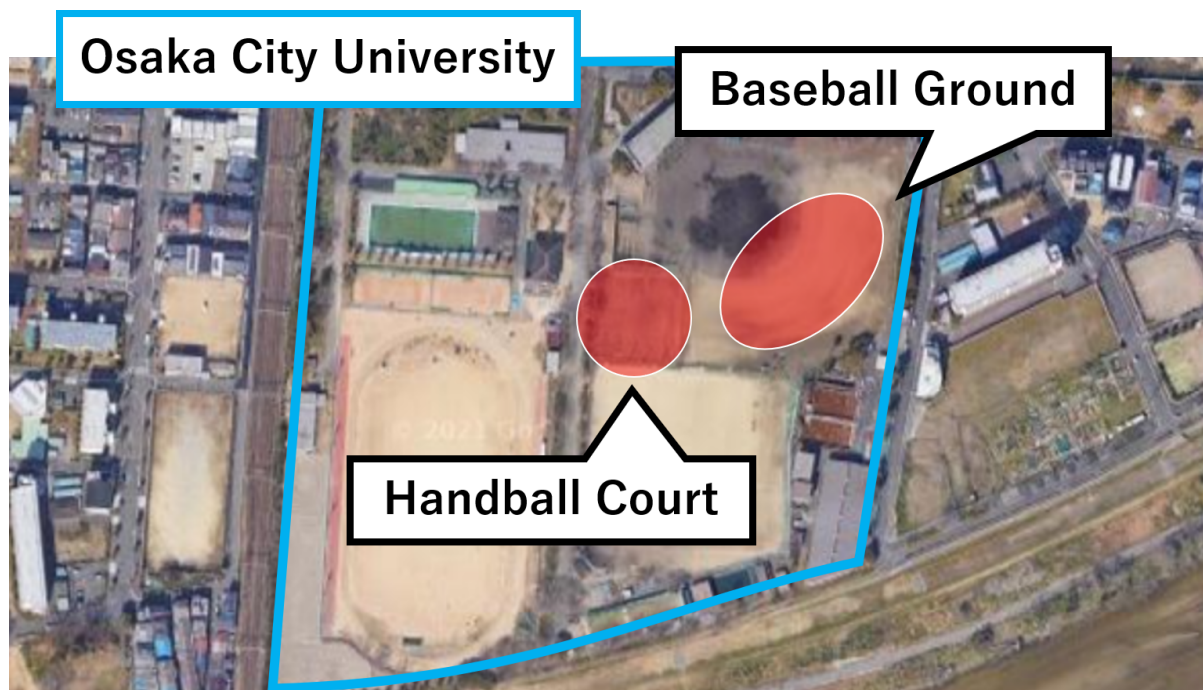


Fig. 5.1 Handball Court and Baseball Ground in Osaka City University

5.2.1 ダミーを配置した場合の撮影計画

1 つ目の実験として、1 台の LiDAR に対して人物行動領域内に複数の人物を配置し、ダミーを配置する場合とダミーを配置しない場合の双方で撮影計画を行い、UAV の目標移動位置の比較を行う。

5.2.2 LiDAR を 2 台用いたマージの実機実験

次に LiDAR を 2 台設置しての人物認識を行う。LiDAR1 の位置は実験設定で述べた位置に配置し、LiDAR2 は南側を向け任意の位置に配置する。

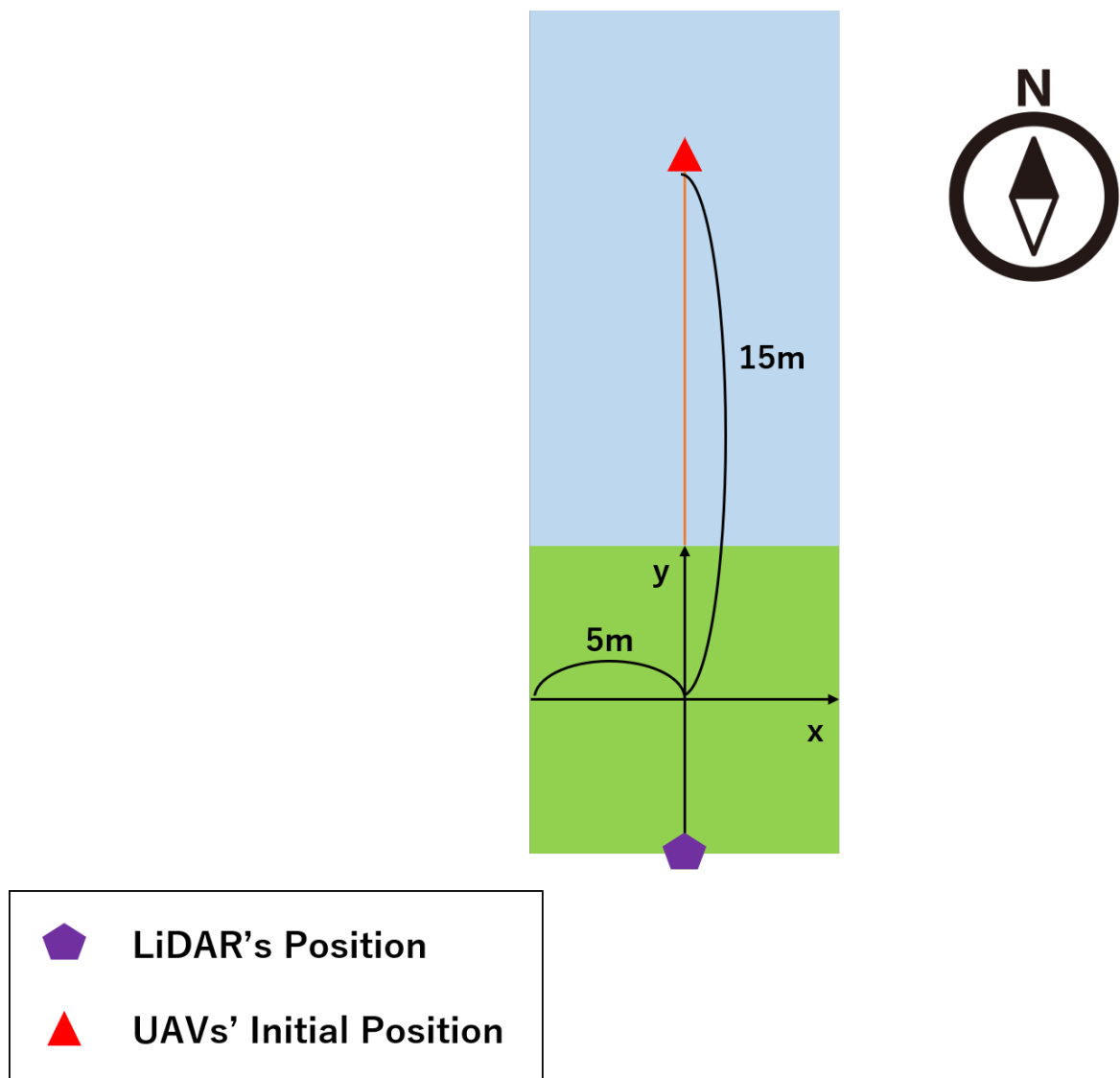


Fig. 5.2 Experiment Environment

5.3 スロープ型の地形でのシミュレーション

5.4 本章のまとめ

本章では2つの実機実験の結果を示し，その結果について考察を行った．

ダミーを配置することにより，配置しない撮影計画と比較して UAV の目標位置が変化す

ることを示した.

次に 2 台の LiDAR での人物認識について, 各 LiDAR から得られたデータをマージし, そのマージが適切であるかの判断を行った.

次章では, この実験全体に対してのまとめと課題, 今後の展望について論述する.

第 6 章

結論

6.1 まとめ

本論文では、昨年度まで行っていた UAV を用いた撮影計画であげられていた、オクルージョンエリアの撮影を行うための手法の提案、また複数台の LiDAR を使用するための手法の提案を行いそれらの手法を用いた実機実験を行い評価を行った。

6.2 課題と展望

本研究では実機実験を行う際に誤差が発生する要因が多く存在する。

1 例としては UAV の性能に大きく関わるという点である。先行研究では M600 を使用したが本研究では MavicMini を使用した。MavicMini は 199g の小型ドローンであり大型のドローンに比べ、持ち運びや準備が容易であり、危険性が小さいのが利点である。しかし機体が小さいため性能が制限される。風が吹いた時の機体の制御は大型のドローンに比べおとし、GPS のアンテナも小型なため GPS 座標の安定性が低い。バッテリーの持続時間にも問題点があり、今後実際にスポーツの試合を撮影するなどの長時間にわたる実機を用いた撮影計画に支障がでる可能性がある。この問題点に関しては UAV の機体依存でありプログラム

などで解決することは困難である。3 章で説明した RTK - GPS 演算を行える機能を搭載した UAV を使用するとより精度の高い撮影計画が望める。屋外のコートを利用する際の方位を取得する方法でも誤差が生じる点がある。コンパスなどを用いて方位を取得するのが一般的な方法であるが、地磁気は不安定であり周囲の金属や電子機器の影響を受けやすい、複数のコンパスを使うなど、方位の誤差を小さくするシステムの構築を考える必要がある。

複数台の LiDAR の実験についても言及することがいくつかある。始めに LiDAR の配置問題である。本研究では 2 台の LiDAR を向かい合わせになるように配置した。しかし、フィールドの大きさや形によって LiDAR の最適な配置は変化すると考えられる。領域内の人物の数、LiDAR の撮影範囲などの要素からオクルージョンエリアが小さくなるような配置を導出することで、撮影計画がより効率的に行われるようになる。

今後はより最適な撮影計画に必要な機能を新たに実装しつつ、課題点を解決し複数 UAV の同時制御と人物追従の精度の向上を目指す。

謝辞

本論文を作成するにあたり，終始懇切なるご指導，御鞭撻を賜りました本学電子情報系専攻の田窪朋仁教授に厚く御礼申し上げます．また，研究を進める上で様々なご助言をいただきました，上野敦志講師に感謝の意を表します．最後になりましたが，本研究室の皆様にも日頃からご協力頂いたことに感謝いたします．

参考文献

- [1] Yuri Nishikawa, Hitoshi Sato, and Jun Ozawa, “Multiple sports player tracking system based on graph optimization using low-cost cameras”, 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp.1–4, 2018.
- [2] 西川由理, 佐藤仁, 小澤順, “グラフ最適化を用いた多人数追跡手法におけるグリッドマップ生成の並列化”, 人工知能学会全国大会論文集 2018 年度人工知能学会全国大会 (第 32 回) 論文集, pp.2D101–2D101, 2018.
- [3] Teuliere C, Eck L, and Marchand E, “Chasing a moving target from a flying uav”, Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.4929–4934, 2011.
- [4] Bethke B, Valenti M, and How J, “Cooperative vision based estimation and tracking using multiple UAVs”, Advances in cooperative control and optimization, pp.179–189, 2007.
- [5] T Nasser, J Sturm, and D Cremers, “FollowMe: Person following and gesture recognition with a quadcopter”, Proceedings in IEEE/RSJ IROS, pp.624–630, 2013.
- [6] E Price, G Lawless, H H Bulthoff, M Black, and A Ahmad, “Deep Neural Network-based Cooperative Visual Tracking through Multiple Micro Aerial Vehicles”, arXiv preprint, arXiv:1820.01346, 2018.
- [7] J Wang, W B Chen, and V Temu, “Multi-Vehicle Motion Planning for Search and Tracking.”, IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR), pp.352–355, 2018.
- [8] M Bajracharya, B Moghaddam, A Howard, S Brennan, and L H Matthies, “A Fast Stereo-

- Based System for Detecting and Tracking Pedestrians from a Moving Vehicle.”, The Int’l J. Robotics Research, Vol.28,pp.1466–1485, 2009.
- [9] T Furukawa, F Bourgault, B Lavis, and H F Durrant-Whyte, “Recursive Bayesian search-and-tracking using coordinated UAVs for lost targets.”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2521–2526, 2006.
- [10] T Furukawa, L C Mak, H Durrant-Whyte, and R Madhavan, “Autonomous bayesian search and tracking. and its experimental validation.’, Advanced Robotics, 26(5-6):pp.461–485, 2012.
- [11] Pack D J, P Delima, and G J Toussaint, “Cooperative control of UAVs for localization of intermittently emitting mobile targets”, IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics, vol.39,no.4,pp.959–970, 2009.
- [12] 佐々木徹 “地上設置 LiDAR と複数 UAV を用いた人物追従システムに関する研究”, 大阪市立大学 修士論文, 2019

研究業績

国内発表（査読なし）

- 小林大気, 田窪朋仁, 上野敦志, “離散時間運動学モデルに基づく二足歩行ロボットの3次元脚配置計画”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 (ROBOMECH2013), 1A1-P11, May 2013.

国際発表（査読あり）

- **Daiki Kobayashi**, Tomohito Takubo, Atsushi Ueno, “3D Gait Planning Based on Discrete-time Kinematic Model of Biped Walking”, The 25th 2014 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS2014), Nagoya, Japan, Nov. 2014.

論文誌

- **Daiki Kobayashi**, Tomohito Takubo, Atsushi Ueno, “Model-Based Footstep Planning Method for Biped Walking on 3D Field”, Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 27, no. 2, pp. 156–166, Apr. 2015.