

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

- My hovercraft is full of eels.
- A légpárnás hajóm tele van angolnákkal.
- 私のホバークラフトは鰻でいっぱいです。
- 小なり <; 等号 =; 大なり >;

二足歩行ロボットの自律移動には，目的地までの経路選択や軌道計画のみならず，局所的範囲での機構制約や地形に適応した，実時間での脚配置計画が重要となる．脚配置計画手法としてよく研究されている固定パターンの組み合わせ問題としてグラフ探索手法で解く探索ベース手法では，地形適応などが容易に行えるが，厳密な最適化はできず，探索における計算コストも高い．一方で，脚先遷移を運動学モデルで表現して逆運動学問題として解くモデルベースの手法も提案されており，原理的により厳密に最適化でき計算コストも低く抑えられるため，局所的な脚配置計画としてはより適していると考えられる．平面上では実時間で計画可能なモデルベース手法が既に提案されているが，三次元地形上での計画は実現されていなかった．

そこで，従来の水平方向移動のみを考慮した歩行モデルに独立した垂直方向の移動動作を加え，地形の形状情報に基づき，遊脚の接地点を支持脚基準の着地ワークスペース範囲内へ制限する制約を定式化し加えることで，実時間性を維持しつつ，三次元地形に適応可能なモデルベースの脚配置計画手法を提案した．二足歩行ロボット HRP-2 および NAO を想定した計画シミュレーションにより，段差など不連続な変化のある地形形状では最適化計算の不安定性に関して改善の余地があるが，連続的な形状の地形では安定して最適化された脚配置

が得られており，またいずれにおいても実時間で計画できていることを示した．

目次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.2	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
3.4.2	直線探索	17
3.5	終了判定	17
3.6	地形情報の構築	17
3.7	本章のまとめ	18
第 4 章	実環境におけるシステム構築	19
4.1	はじめに	19
4.2	Robot OperationSystem の概要	19
4.3	ROS による UAV 制御	20
4.4	地上設置 LiDAR と GPS センサ	21
4.5	本章のまとめ	23
第 5 章	NAO における脚配置計画シミュレーション	25
5.1	踏破性能とパラメータ設定	25
5.2	スロープ型の地形でのシミュレーション	27
5.3	実地形データを用いた地形情報構築と計画	28
5.4	実機実験	28
5.4.1	計画の実機適用と動作確認	29
5.4.2	目標到達精度および歩行の安定性の評価	29
5.5	本章のまとめ	31
第 6 章	結論	32
6.1	まとめ	32
6.2	課題と展望	33

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
4.1	Mavic Mini	21
4.2	UTM-30LX-EW	22
4.3	UST-30LX	23
4.4	Multi-band GNSS Antenna ANN-MB-01	24
4.5	Wireless Communication Model for LiDAR and GPS antenna	24

表目次

5.1	Model parameters for NAO	26
5.2	Algorithm parameters for NAO	26
5.3	Map parameters for NAO	26
5.4	Result of planning (slope)	27
5.5	Results of evaluation experiment of goal reaching error	30

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・警備などのセキュリティや災害などの救助活動，スポーツ戦略分析など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している [1, 2].

その中でも，カメラ自身が撮影対象に応じて移動することによって，一定の画角に縛られることなく，オクルージョン等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を推定している [4]. Naseer らは，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，天井に向けたカメラで AR マーカによる UAV の

位置推定を行っている [5]. Price らは, MAV に搭載された PC 上でリアルタイムで動作し, かつ信頼性がある人物認識のためのニューラルネットワークを実現し, そのニューラルネットワークの認識結果を利用し, 複数の MAV で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存在する, Bajracharya らは, 地上を移動するロボットにレーザ測域センサ (LiDAR) を搭載し, LiDAR から取得した点群情報から歩行者の認識・追従を行う [8]. また古川らは, 海上で遭難した人物を UAV を利用して救助活動を行うことを想定し, 再帰的ベイズ推定で対象人物の移動の推定を行い, 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, 追従対象である移動物体が断続的に信号を発信し続けて, その取得した信号に基づいて複数の UAV を制御している [11].

そこで我々は, 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. 提案するシステムでは, LiDAR で得られる点群情報から人物の位置検出を行い, UAV に搭載されたカメラ (移動カメラ) から得られる画像データを解析することで, 人物の着用するビブスの背番号から個人の特定を行う. さらに, LiDAR からはオクルージョンや自由に撮影位置を変更ができないといった理由により追従することのできない人物を, 移動カメラの画像情報から補完し, 正確な移動軌跡の導出を行う.

そこで我々は, 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. 提案するシステムでは, LiDAR で得られる点群情報から人物の位置検出を行い, UAV に搭載されたカメラ (移動カメラ) から得られる画像データを解析することで, 人物の着用するビブスの背番号から個人の特定を行う. さらに, LiDAR からはオクルージョンや自由に撮影位置を変更ができないといった理由により追従することのできない人物を, 移動カメラの画像情報から補完し, 正確な移動軌跡の導出を行う.

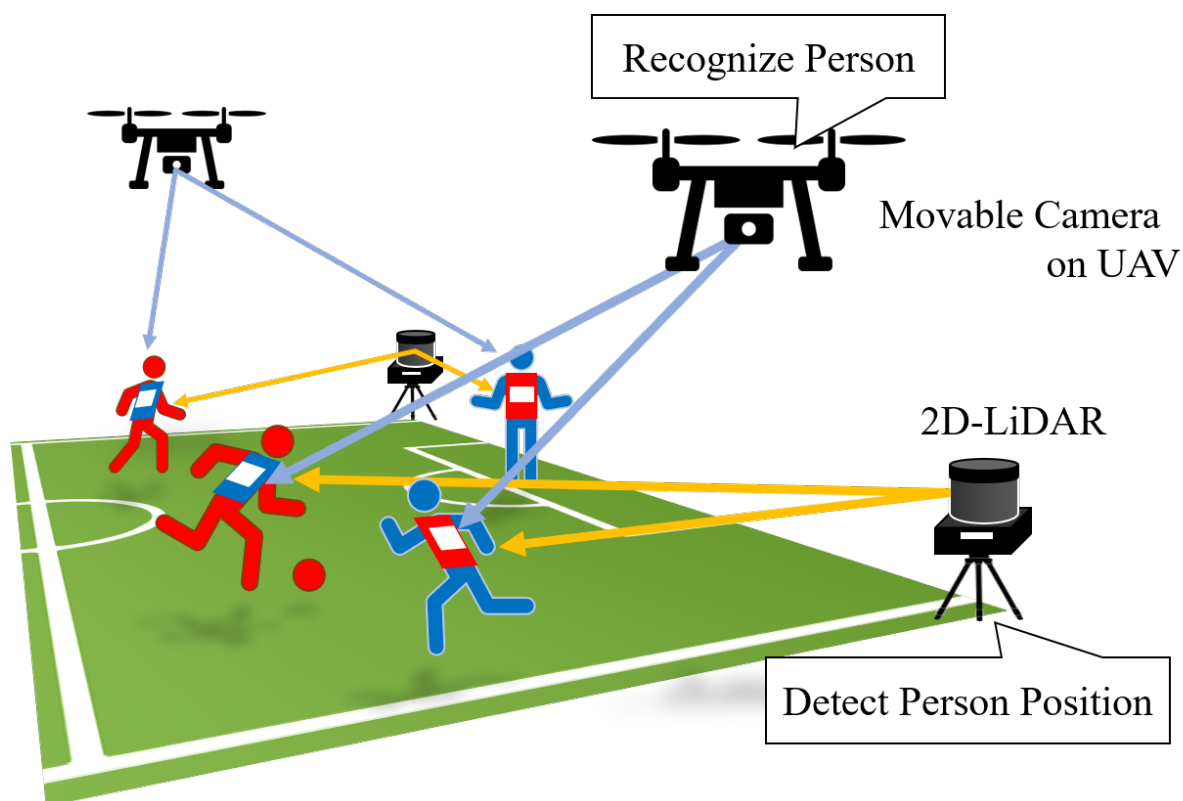


Fig. 1.1 Proposed Monitoring System

1.2 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の位置と角度の校正手法について述べる。4章では、屋外での実機実験の実装とその実験の結果について述べる。最後に5章では、本研究の結果などについてまとめ、今後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．

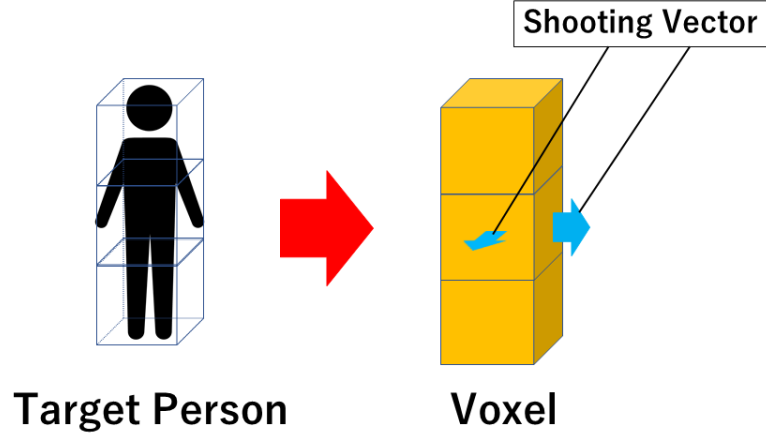


Fig. 2.1 Model of Shooting Vector

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．

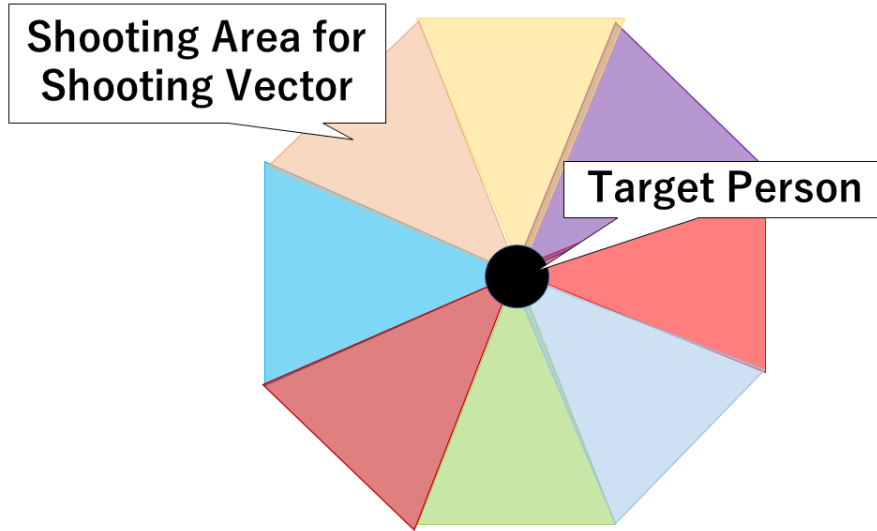


Fig. 2.2 Shooting Area of One Target Person

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．

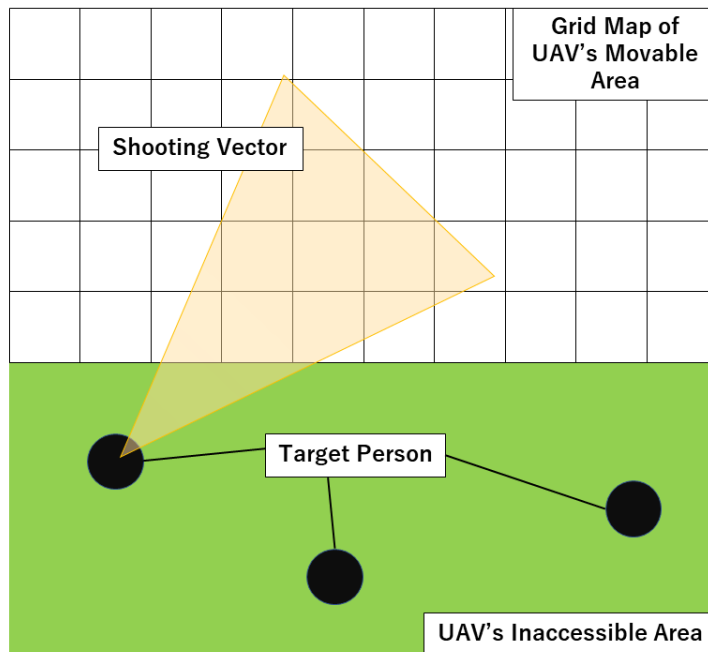


Fig. 2.3 Grid Map and Shooting Vector (a)

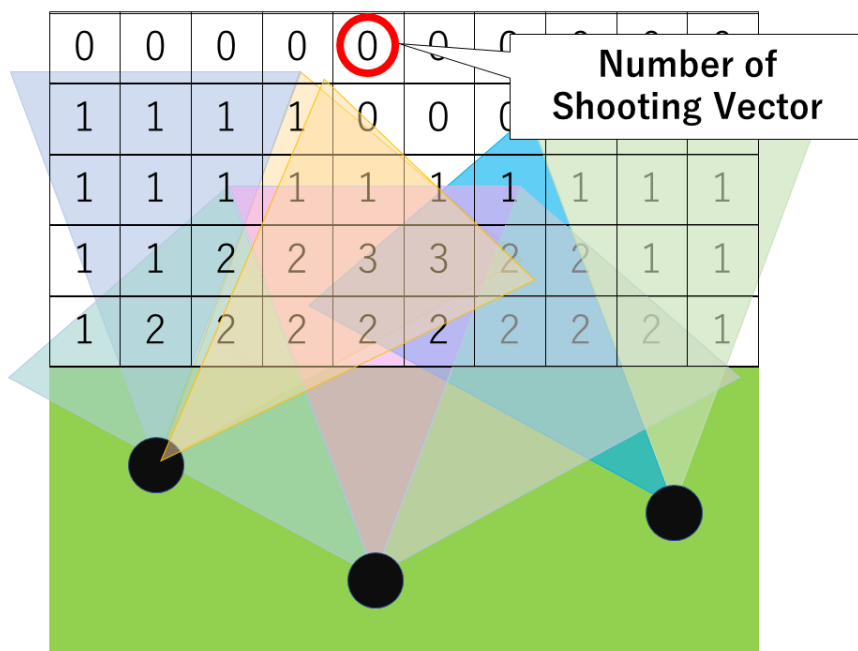


Fig. 2.4 Grid Map and Shooting Vector (b)

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，

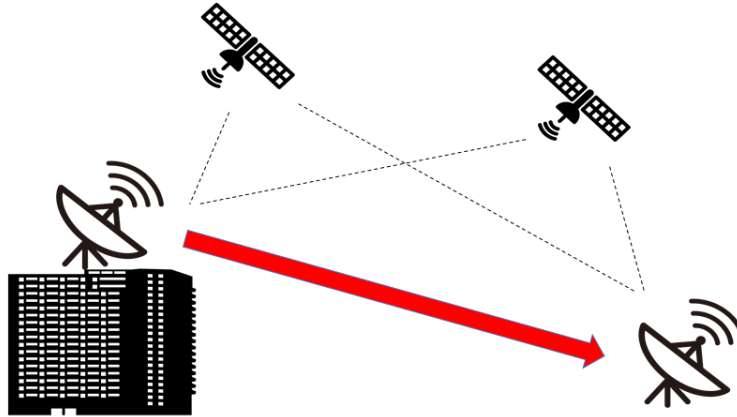


Fig. 3.1 Image of RTK-GPS Positioning System

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。

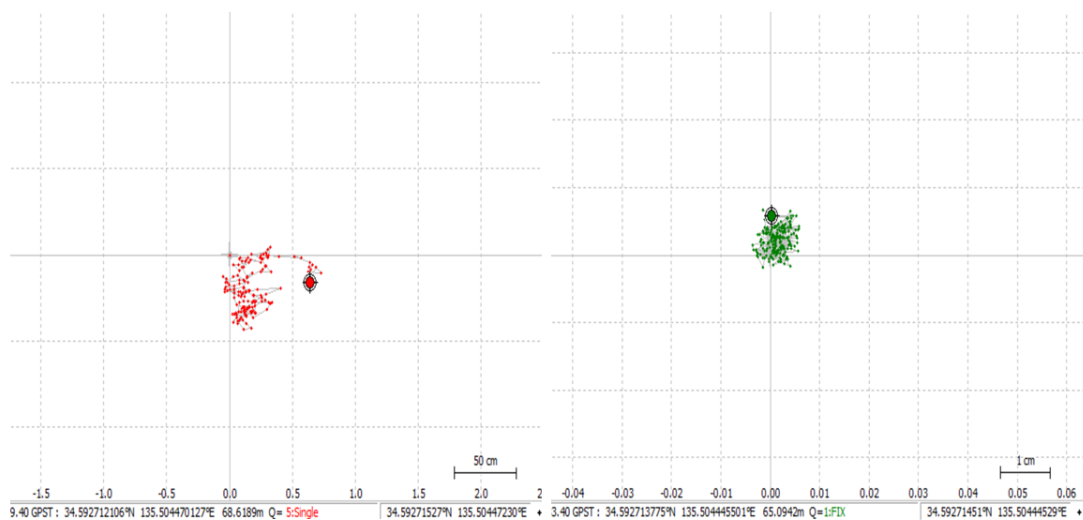


Fig. 3.2 Single GPS Positioning (right) and RTK-GPS Positioning (left)

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

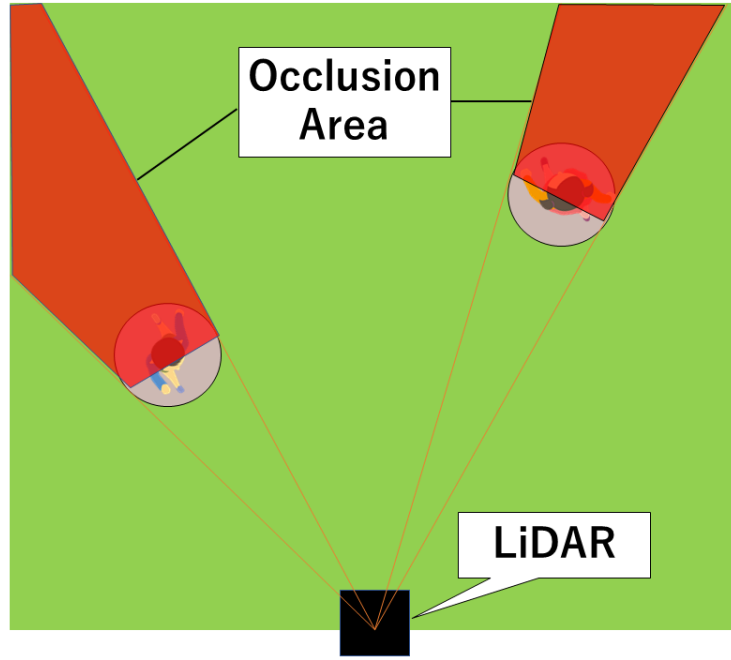


Fig. 3.3 Occlusion Area

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．

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

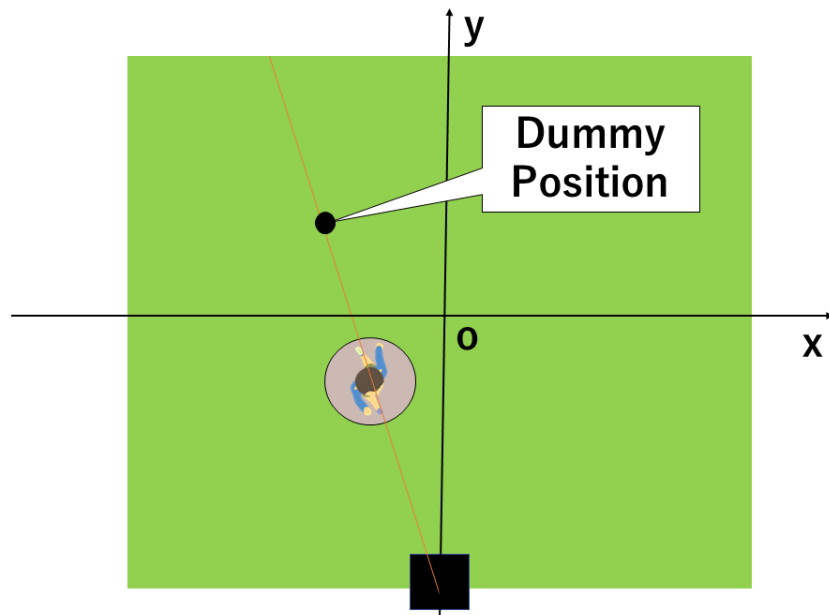


Fig. 3.4 Dummy Position

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．

3.4.2 直線探索

3.5 終了判定

3.6 地形情報の構築

3.7 本章のまとめ

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。

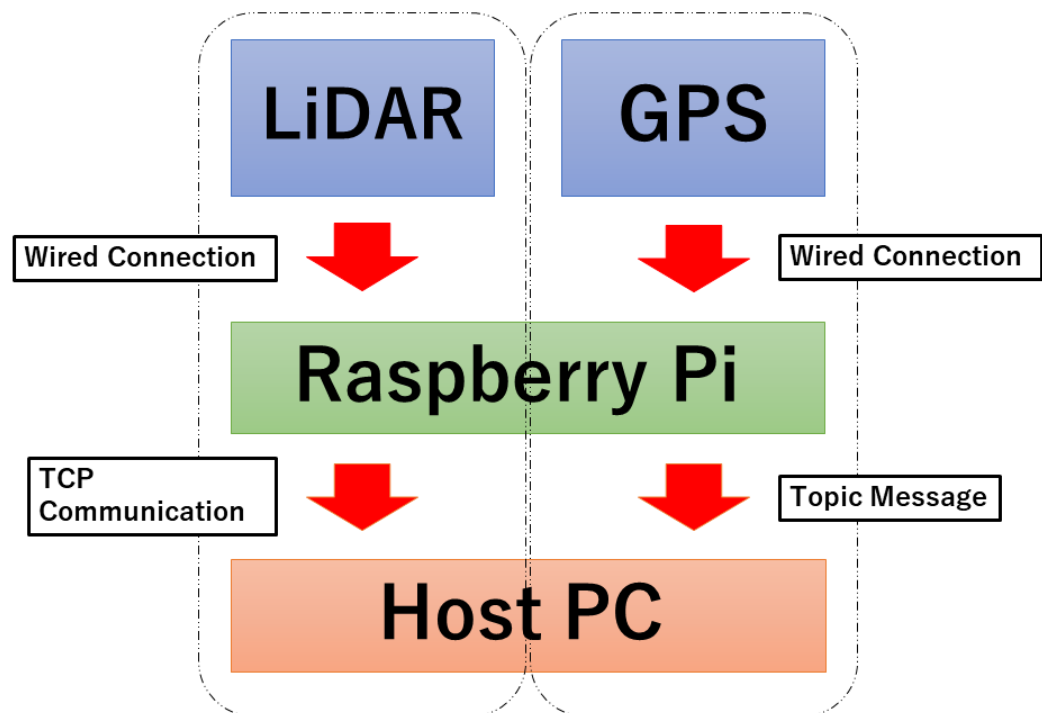


Fig. 4.5 Wireless Communication Model for LiDAR and GPS antenna

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．

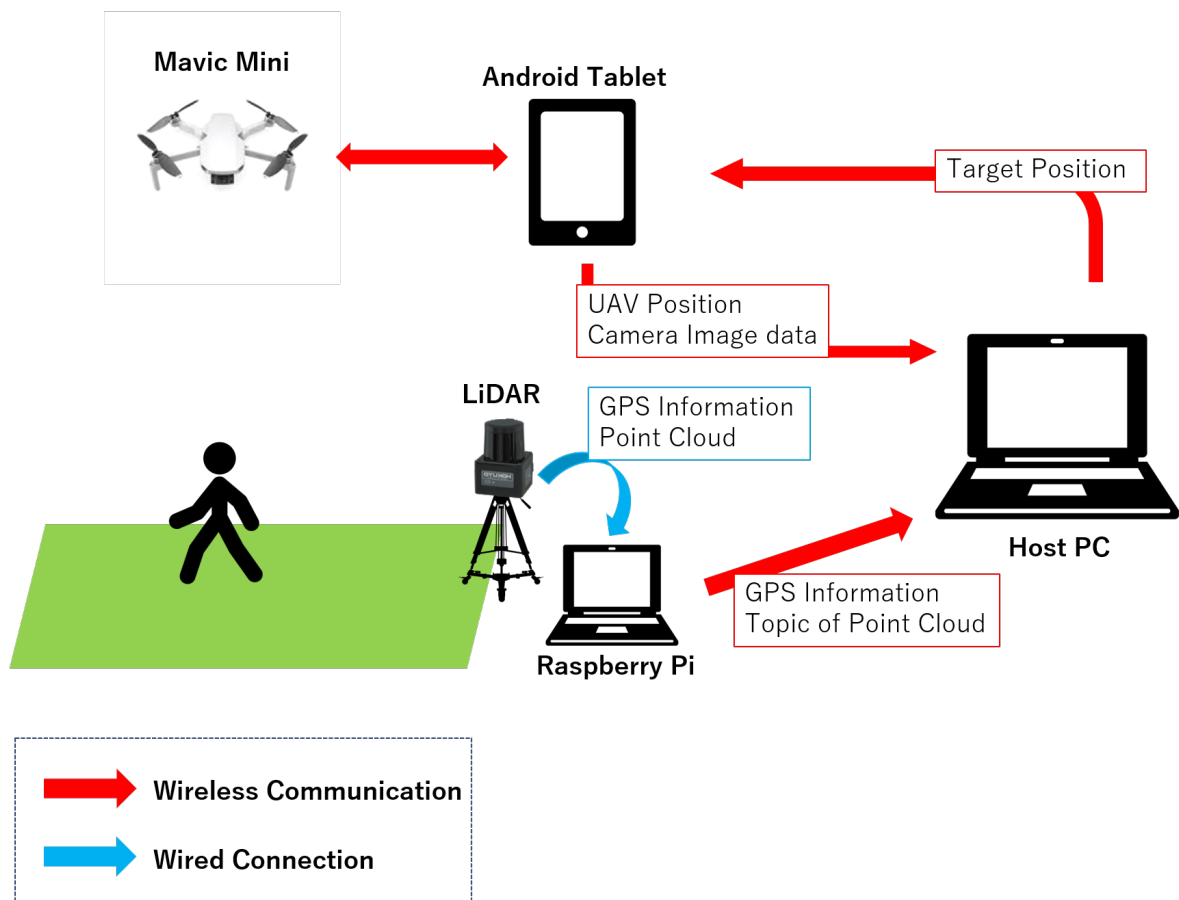


Fig. 4.6 Communication System

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

実験は大阪市立大学の野球場で行った．東を x 軸正方向，北を y 軸正方向，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．

5.3 スロープ型の地形でのシミュレーション

5.4 実地形データを用いた地形情報構築と計画

実際のロボットが自律移動を行う場合、環境の設計図などから事前に得られた地形形状を用いるのではなく、環境中で測域センサなどを用いて計測したデータから適宜地形情報を構築し、脚配置計画を行う必要がある。

ここでは、Kinect v2 を用いて実際に取得した点群データから地形情報を構築し、その地形データを用いて計画シミュレーションを行う。??と同様のスロープ型地形を用意し、ワールド座標系基準で (40.0, -113.0, 88.5) の位置にチルト角 15.4° で見下ろす姿勢で設置した Kinect v2 で距離画像を取得する。そして、取得した画像をワールド座標系基準の点群データへ変換し、それを用いて??に示す手順で $z_{\text{field}}(x, y)$ を構築する。問題としても??と同様、初期状態 $\mathbf{q}^0 = (0.0, 0.0, 0.0, 10.0, 0.0, 0.0)^T$ (cm, deg) から目標状態 $\mathbf{q}_{\text{goal}} = (50.0, 150.0, 0.0, 10.0, 0.0, 0.0)^T$ へと向かう計画を行う。

??および??に結果を示す。ワンスキャンでの計測であること、およびノイズを考慮した地形情報構築ができていないことなどから、マップに歪みが含まれている。そのため、初期状態付近で地形適応制約を守るために小さい歩幅で歩行する必要があり、理想関数上での計画結果とは異なり 13 ステップでの計画となっている。計算時間は十分歩行周期以内に収まっており、実時間制は保たれている。

5.5 実機実験

ここからは、実機を用いた実験について述べる。

NAO への歩行指令では、まず脚配置計画を行い、得られた脚配置の系列から踏み出し量の系列を求める。次に、NAO の制御システムである NAOqi OS が標準で提供している、踏み出し量と時間を指定して踏み出しを行わせる API を歩数分だけ呼び出して歩行を指令す

る．この API 呼び出しに対して，NAOqi OS 内の歩行制御モジュールによって軌道生成が行われ，指示した脚配置計画を実現する歩行制御が行われる．なお，この API は平面上の歩行のためのものであり，平面上での位置と姿勢を指令するもので，内部で行われる歩行制御も平面歩行のためのものである．また，内蔵カメラの画像を用いた自己位置および姿勢の推定は行われておらず，外部のカメラによる計測や補正も行っていない．

5.5.1 計画の実機適用と動作確認

まず，提案手法によって得られる脚配置計画が実際に実機に適用可能であることを確認する実験を行った．??におけるシミュレーションの傾斜角 4.5° の場合の計画を NAO に適用した．??にその結果を示す．

平面上の歩行を仮定した歩行制御を用いて斜面を歩かせているため，歩行が不安定になり姿勢が計画からずれたものとなった．しかし，地形制約により上下方向の移動が NAO の許容値である 0.5 cm 以下に抑えられた計画がなされているため，制御のロバスト性で姿勢を維持でき，目標状態付近まで到達することができている．これにより，提案手法で実機に適用可能な脚配置計画が得られていることが確認できた．

5.5.2 目標到達精度および歩行の安定性の評価

次に，終了時の位置・姿勢と，歩行中の足裏圧力センサの値を計測し，目標状態への到達精度と，歩行の安定性について評価する実験を行った．いずれの評価においても，??における傾斜角 4.5° の場合の地形を対象とし，提案手法による地形形状を考慮した計画と，従来手法による平面上での計画の結果それぞれを用いて歩行させ，データを計測した．なお，提案手法を用いない場合は 11 ステップの計画となっており，提案手法における計画結果の 12 ステップより少ない．

まず，目標状態への到達精度の評価について述べる．歩行終了時の左脚の位置 x, y および姿勢 θ を計測し，計画で設定した目標状態 ($x = 50\text{ cm}$, $y = 150\text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$) に対する誤差を評価した．なお，初期状態は ($x = 0\text{ cm}$, $y = 0\text{ cm}$, $\theta = 0^\circ$)．提案手法，従来手法それぞれ

Table 5.1 Results of evaluation experiment of goal reaching error

method	x (cm)	y (cm)	θ (deg)
proposal	-24.4 ± 2.5	5.3 ± 1.0	21.0 ± 2.7
nonproposal	-46.5 ± 10.3	5.9 ± 3.3	39.1 ± 7.4
proposal (plane)	2.3 ± 3.7	6.7 ± 1.6	5.4 ± 2.8

で五回ずつ実験を行った。なお、NAO による歩行精度の参考として、提案手法での計画を用いて平面上を歩かせた場合の歩行についても同様に計測を行った。Table 5.1 に、提案手法および従来手法での斜面歩行における誤差および提案手法での平面歩行における誤差の、五回の試行での平均と標準偏差を示す。まず評価の前提として、提案手法で平面を歩行させた場合の結果から NAO による歩行では平面上においても誤差が生じてしまうこと、また提案手法での斜面歩行の結果と比較すると x , θ について誤差が増加しており斜面歩行では更に精度が落ちることがわかる。これを踏まえても、提案手法と従来手法とによる斜面歩行の結果を比較すると、いずれの要素についても明らかに誤差が改善されており、特に x , θ においては大きな改善が見られる。標準偏差を比較しても、いずれの要素においても提案手法のほうが小さく抑えられている。これらの結果から、従来手法に対して、提案手法によって目標到達の精度が改善されていることが分かる。

次に、片脚支持期の ZMP 値を用いた歩行の安定性の評価について述べる。NAO の左右の足裏それぞれ四ヶ所 $((7.025, 2.310), (7.025, -2.990), (-3.025, 1.910), (-2.965, -2.990)(\text{cm}))$ に配置されている圧力センサの値を 25 ms ごとに計測し、脚先座標系 Σ_{fl} および Σ_{fr} 基準の片脚支持期の ZMP 応答値を算出した。

提案手法と従来手法とで 12 s 以降の左脚の ZMP 応答を比較する。 x 軸方向??及び y 軸方向??いずれについても、従来手法においては、本来 12 s 以前の応答と同様にすぐに 0 に戻るはずであるが、0 から変化したあとに戻るのが明らかに遅く、歩行が不安定になっていることが分かる。提案手法ではこのような ZMP の応答は見られず、それ以前と同様の応答を示しており、斜面上においても安定して歩行ができていることが分かる。

最後に、床反力の評価について述べる。ZMP 評価と同様に三回目の実験データを用い、左右それぞれについて圧力センサの示す値の合計値を比較した。一つの圧力センサで最大

25 N まで計測でき、片脚全体の床反力は最大 100 N である。??に提案手法および従来手法それぞれにおける左右の足裏の床反力の遷移を示す。

提案手法を用いない場合の結果において、左脚の床反力値が 12 s 以降に高い値をとっている。これはバランスを崩したことによって左脚が強く着地してしまったことを表しており、歩行が不安定になっていたと考えられる。これに対して、提案手法では床反力は最後まで周期的に変化しており、歩行の安定性が改善されていると言える。

以上の実験データおよび評価から、目標到達精度、および ZMP 応答および床反力で評価した歩行の安定性について提案手法の有効性が確認された。

5.6 本章のまとめ

本章では、二足歩行ロボット NAO において、標準の平面歩行制御における垂直方向のロバスト性を利用した三次元地形での計画として、まず、計画シミュレーションによりスロープ形状の地形に適応した脚配置計画が得られることを確認した。また、Kinect v2 センサを用いて実際に計測したスロープに対しても同様に計画ができることを示した。さらに、実機実験により実際に前述のロバスト性を利用してスロープを歩行できる計画が得られていることや、目標到達の精度や歩行の安定性について有効性があることを示した。

第 6 章

結論

6.1 まとめ

本論文では、二足歩行ロボットにおける地形形状を考慮した三次元脚配置計画の手法を提案した。従来の水平方向の脚配置計画のためのモデルに、独立した垂直方向の動作を追加し、脚配置遷移モデルの状態および入力についての次元の拡張を行うことなく、事前に与えられた地形情報に基づいて垂直方向の移動量を制限する制約を定式化し追加することで、計算コスト増加を抑えつつ三次元地形への適応を可能にした。ヒューマノイドロボット HRP-2 を想定した計画シミュレーションを行い、連続的変化の三次元地形に対しては実時間で脚配置計画の最適化が行えることを示した。不連続な変化のある地形では計算が不安定化してしまうといった課題が残るが、地形情報の構築方法や計算手法などの見直しで改善できると考えられる。また、ヒューマノイドロボット NAO を想定した計画シミュレーションも行い、HRP-2 想定の時と同様に実時間で地形適応を実現したかいが得られることを示し、また実機実験により、実際に二足歩行ロボットに適用可能な脚配置が得られていることを確認した。

6.2 課題と展望

残された課題として、まず計画シミュレーションにおいても示された不連続な地形変化に対する求解性能の低下を改善する必要がある。現在の二次計画法を利用した反復法による最適化は、[?] でモデル予測制御に使われていることなどから実用上は十分なものであるが、その収束性については厳密には保証されていない [?]. また、脚先の三次元的な姿勢および形状を考慮できていないという問題がある。これらを考慮して制約条件を追加し、地形との接触に関して傾きの大きすぎる場所への接地を避けるような計画を行う必要がある。これに関連して、地形情報の構築方法についても、現在の簡易的なものではなく、誤差を考慮した制約設定を可能にする、実際の形状からの誤差範囲を保証できるような方法の検討が必要である。また、三次元歩行における消費エネルギーを評価に含めて最適化を行う計画手法について検討を進めていく。これは、現在の近似前の評価関数は目標状態との誤差のみを評価しており、ロボットの移動において重要な指標となる消費エネルギーを最適化できていないためである。

将来的な展望として、モデルベースと探索手法の住み分けについての検討が必要であると考えている。提案手法の目標距離の限界は原理上存在しないが、実際の制御では脚配置に誤差が必ず発生するため長距離に渡る最適化を行うのは実用上の意味があまりないと考えられる。そこで、離散的な粗い探索による長距離の歩行計画と、提案手法であるモデルベースの脚配置最適化を組み合わせた手法が必要になると考えており、組み合わせ方や住み分けの仕方について調査・検討を進めていく。また、現状の歩容制御と切り離した上での脚配置計画ではなく、歩行制御計画と脚配置計画とを統合した、歩容全体の計画を行う手法の検討を進めていく。

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, “FollwMe: 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.