

エネルギー科学研究科
エネルギー社会・環境科学専攻修士論文

題目： 隠消現実感のための隠背景
撮影カメラ最適配置探索手法の開発

指導教員： 下田 宏 教授

氏名： 三木 直也

提出年月日： 令和2年2月14日(金)

論文要旨

題目： 隠消現実感のための隠背景撮影カメラ最適配置探索手法の開発

下田研究室、三木直也

要旨：

原子力プラントの内部は複雑に入り組んでおり、見通しの悪い箇所が多い。そのため、原子力プラント内では、機材の運搬中に作業員と接触するなどの事故が発生する恐れがある。この問題を解決する手段として、隠消現実感を用いることが考えられる。隠消現実感とは、現実世界に存在する物体を視覚的に除去し、除去した物体の裏側の様子の観察を可能にする技術である。隠消現実感を実現する方法としては、除去対象の周辺を撮影した映像をもとに除去対象の裏側（隠背景）を推定する方法と、隠背景を撮影するカメラ（隠背景撮影カメラ）を設置し、実際の隠背景の様子を撮影して利用する方法がある。原子力プラント内の見通しが悪いという問題を解決するためには、後者の方法を用いる必要があるが、原子力プラント内には配管やタンクなどの視覚的障害物が数多く存在し、カメラを設置できる箇所の候補も多い。また、原子力プラント内の物体は複雑な形状をしたものが多く、その表面にカメラを設置できるかどうかの判断が困難である。そのため、隠背景撮影カメラの設置位置をユーザが判断しづらいという問題がある。

そこで本研究では、原子力プラント内で利用することを想定した、隠背景撮影カメラの配置探索手法を開発することを目的とする。本研究の目的が達成されれば、容易に隠消現実感が利用可能になり、原子力プラント内の接触事故のリスクが低減され、作業の安全性が向上すると期待される。

本研究で開発する手法では、隠消現実感を利用する環境の3次元点群モデル、隠消現実感で観察したい領域（可視化対象領域）、隠消現実感の実行中にユーザが移動する領域（ユーザ移動領域）をもとに、準最適なカメラの配置を求める。具体的には、まず、3次元点群モデルから Region Growing と RANSAC を用いて平面を認識し、環境中でカメラが設置可能な領域を抽出する。次に、この領域の中から、可視化対象領域およびユーザ移動領域の位置関係を考慮しながら、隠背景を適切に撮影できるカメラ配置を、遺伝的アルゴリズムを用いて求める。

開発した手法は、実在する環境を撮影した画像をもとに作成した3次元点群モデルを具体例として評価した。その結果、遺伝的アルゴリズムでの世代数が増加するにつれ、カメラが撮影できる可視化対象領域が次第に広くなることが確認でき、手法が適切に実行できていることが確認できた。さらに、開発した手法で求められるカメラ配置で隠消現実感を実行した場合、適切に隠背景を可視化できることが分かった。また、人がカメラの配置を考えた場合では思いつきにくい配置が求められることも分かった。

今後の課題としては、実際のカメラを用いた場合でも、出力されたカメラ配置で隠消現実感が適切に実行できることを確認すること、可視化対象領域およびユーザ移動領域を容易に設定可能にするためのインタフェースを開発すること、本手法を用いて求められたカメラ配置を拡張現実感を用いて直感的に提示するインタフェースを開発することなどが挙げられる。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	2
2.1 研究の背景	2
2.2 カメラの配置探索に関する既往研究	5
2.3 研究の目的と意義	6
第 3 章 隠背景撮影カメラ配置探索手法の提案	7
3.1 DR-CAPE の目的	7
3.2 DR-CAPE を開発する上での前提条件	7
3.2.1 DR-CAPE を実行する環境に関する前提条件	7
3.2.2 環境に配置する隠背景撮影カメラに関する前提条件	8
3.2.3 可視化する領域とユーザが移動する領域に関する前提条件	10
3.3 DR-CAPE の処理の流れ	11
3.3.1 DR-CAPE の処理の概要	11
3.3.2 カメラ設置可能位置抽出処理の詳細	13
3.3.3 カメラ配置探索処理の詳細	27
3.3.4 カメラ配置評価	34
第 4 章 隠背景撮影カメラ配置探索手法の評価	40
4.1 評価の目的	40
4.2 評価の方法	40
4.2.1 評価の概要	40
4.2.2 評価に使用した環境	41
4.2.3 DR-CAPE の実装	43
4.2.4 パラメータの設定	45
4.3 評価の結果と考察	50
第 5 章 結論	55

謝 辞	57
参 考 文 献	58

目 次

2.1	原子力発電所内部の様子	2
2.2	隠消現実感の例 ^[3]	3
2.3	隠背景のリアルタイム撮影による隠消現実感の例 ^[3]	4
2.4	インペイントを用いた隠消現実感の例 ^[5]	4
3.1	平面および円柱側面の検出例	9
3.2	カメラの回転できる範囲	9
3.3	(a) 隠背景を適切に撮影できるカメラ配置および (b) 隠背景を適切に撮影 できないカメラ配置の例 (真上から観察した図)	10
3.4	可視化対象領域とユーザ移動領域の例	11
3.5	RGB-D カメラで撮影して得られる (a)RGB 画像および (b)Depth 画像の例	12
3.6	点群モデルの例	12
3.7	カメラパスの例	12
3.8	DR-CAPE の主要な処理ステップ	13
3.9	平面の集合とみなした円柱の例	14
3.10	カメラ設置可能位置抽出処理のフロー	14
3.11	平面検出処理のフロー	15
3.12	Region Growing によるクラスタリングの例	16
3.13	RANSAC による直線検出の例 ^[14]	16
3.14	検出した平面のグリッド分割の例	17
3.15	検出した平面上のカメラ設置位置候補抽出のフロー	18
3.16	検出された無限平面への点群投影の例	18
3.17	X 軸および Y 軸の設定のフロー	19
3.18	グリッドのカメラ設置可否判別のフロー	19
3.19	平面上のカメラが設置可能なグリッドとカメラが設置不可能なグリッド の例	20
3.20	ノイズを含む点群の例	21
3.21	ノイズを含んだ点群から検出される平面の例	21

3.22	平面の表面と裏面の法線ベクトルの例	22
3.23	平面のカメラ設置可否判定のフロー	24
3.24	線分 G_iP_j が (a) 障害物と接触しない場合、(b)(c) 接触する場合の例 (真上から見た図)	25
3.25	ブレゼンハムのアルゴリズムによる線分描画の例	26
3.26	ブレゼンハムのアルゴリズムによる接触判定の例	26
3.27	DR-CAPE で実行する GA の染色体と遺伝子の定義	27
3.28	1本の染色体の生成のフロー	28
3.29	カメラをパン方向およびチルト方向へ回転させる角度の選択の例	28
3.30	カメラ配置探索のフロー	29
3.31	2つのカメラ配置間の交叉の例	30
3.32	次世代候補集団の生成	30
3.33	カメラ配置の突然変異の例	31
3.34	カメラの隣接地転移の例	32
3.35	カメラの隣接角回転の例 (カメラを真上から見た図)	32
3.36	次世代集団生成の例	33
3.37	カメラが撮影可能な可視化対象領域グリッドおよび撮影不可能な可視化対象領域グリッドの例	34
3.38	可視化対象領域グリッドの撮影するべき面と撮影する必要がない面の例 (真上から見た図)	35
3.39	可視化対象領域グリッドの撮影の優先度が高い面と低い面の例 (真上から見た図)	35
3.40	カメラ配置の評価点決定処理のフロー	36
3.41	可視化対象領域およびユーザ移動領域の3次元グリッド分割の例	37
3.42	可視化対象領域を構成する各グリッドの各面の点数設定のフロー	38
3.43	ユーザ移動領域グリッドから可視化対象領域グリッドが観察可能な例	38
3.44	各可視化対象領域グリッドの撮影可否判定の例 (真上から見た図)	39
4.1	評価環境の見取り図	41
4.2	評価環境の3次元点群モデル	42
4.3	評価環境内の可視化対象領域およびユーザ移動領域	42
4.4	DR-CAPE の動作例	44
4.5	GA のパラメータ決定のフロー	46

4.6	総世代数が 1000 の場合の世代数と得点率の関係	48
4.7	集団数別の世代数と得点率の関係	48
4.8	突然変異発生確率別の世代数と得点率の関係	48
4.9	隣接地転移発生確率別の世代数と得点率の関係	49
4.10	隣接角回転発生確率別の世代数と得点率の関係	49
4.11	エリート染色体割合別の世代数と得点率の関係	49
4.12	世代数と得点率の関係	50
4.13	世代数の増加に伴うカメラ配置の変化の例	51
4.14	隠消現実感を使用せずにユーザ移動領域から可視化対象領域を撮影した 映像の例	52
4.15	世代数の増加に伴う隠消現実感の実行結果の変化の例	53
4.16	一部のカメラが可視化対象領域内の机に設置されたカメラ配置の例	54
5.1	マーカを用いた可視化対象領域およびユーザ移動領域の指定の例	56
5.2	拡張現実感を用いたカメラ配置表示の例	56

表 目 次

3.1	α に設定する点数	37
4.1	生成した 3 次元点群モデルの点の総数	41
4.2	DR-CAPE を実行した PC の仕様	43
4.3	カメラの仕様	43
4.4	DR-CAPE 実装で設定した各パラメータ	45
4.5	集団数の候補	46
4.6	GA の各種パラメータの候補	47
4.7	DR-CAPE の各処理に要した時間の平均値	52
4.8	カメラ設置可能位置抽出処理で検出した平面数および抽出したカメラ設置可能位置数	53

第 1 章 序論

原子力発電は、大量の電力を供給できる、温室効果ガスや硫黄酸化物などの有害物質の排出量が非常に少ない、核燃料の産出地が化石燃料と比較して広く分布しているため安定して燃料が供給できるなどの利点がある。そのため、日本でも原子力発電は主要な電力の供給源とされ、数多くの原子力発電所が建設、運転されてきた。現在では、2011年に発生した福島第一原子力発電所の事故の影響もあり、一部の原子力発電所のみ稼働している^[1]が、稼働の有無にかかわらず、原子力発電所では設備維持のために保守作業が必要である。

原子力発電所の内部は複雑に入り組み、見通しの悪い箇所が多い。そのため、作業中の作業員に機材を運搬している作業員が接触するなどの事故が発生する可能性がある。この問題を解決する手段として、隠消現実感を現場で利用することが考えられる。隠消現実感とは、現実世界に存在する物体を視覚的に除去し、その裏側の様子の観察を可能にする技術である^[2]。隠消現実感を用いて、原子力発電所内の見通しが悪いという問題を解決するには、カメラを環境に配置して、除去対象の裏側をリアルタイムで撮影し、撮影した画像を利用して、除去対象の裏側の様子を観察できるようにする必要がある。しかし、原子力発電所の内部には、配管やタンクなどの視覚的障害物が数多く存在する。また、原子力発電所内にはカメラを設置できる箇所が膨大にある上に、複雑な形状をした物体が多く存在し、カメラを設置できるかどうかを判断することが困難である。このように、原子力発電所内では、隠消現実感で使用するカメラの適切な設置位置の判断が困難であるという問題がある。

そこで本研究では、原子力発電所内での使用を想定した、隠消現実感のためのカメラの配置探索手法を開発することを目的とする。また、本研究では、本手法を実装して実在する環境に対して使用することで、本手法がカメラ配置をどの程度適切に求められるか評価した。

本論文は全5章で構成される。第2章では、研究の背景と目的について述べる。第3章では、提案した手法の概要について述べる。第4章では、提案した手法の評価について述べる。第5章では、本研究の結論および今後の課題について述べる。

第 2 章 研究の背景と目的

本章ではまず、原子力発電所における保守作業の問題点を述べる。さらに、その問題点を解決できると期待される隠消現実感およびその問題点について述べる。その後、カメラの配置探索に関する既往研究とそれらの問題点、および本研究の目的と意義について述べる。

2.1 研究の背景

原子力発電所の内部は、図 2.1 に示すように複雑に入り組んでおり、見通しの悪い箇所が多い。そのため、原子力発電所内では、機材を運搬中に作業員と接触するなどの事故が発生する恐れがある。



Copyright (C) 2020 Japan Atomic Energy Agency

図 2.1: 原子力発電所内部の様子

この問題を解決する手段として、隠消現実感を利用することが考えられる。隠消現実感とは、現実世界に存在する物体を視覚的に除去し、除去した物体の裏側の様子の観察を可能にする技術である^[2]。図 2.2 に、隠消現実感の実行例を示す。図 2.2 では、机と椅子を視覚的に除去し、その裏側の様子をユーザに提示している。

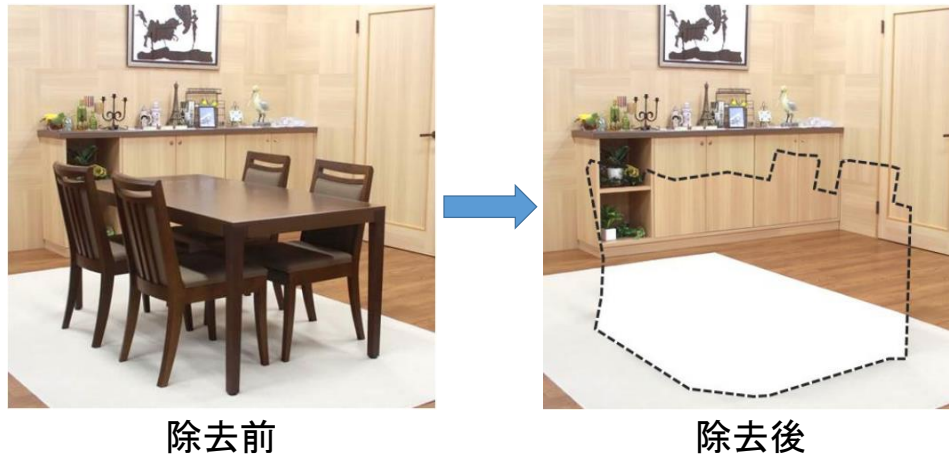


図 2.2: 隠消現実感の例^[3]

物体を除去した結果を提示するためには、除去対象の裏側の映像を取得し、それをユーザの視点に合わせて投影・合成する必要がある。この除去対象の裏側の空間を隠背景と呼ぶ^[2]。隠背景を取得する方法は、以下の2つに大別される^[3]。

1. 事前に設置したカメラで隠背景をリアルタイムに撮影し、撮影した映像をユーザの視点に合わせて投影・合成する手法^[3]。
2. カメラで隠背景を直接は撮影せず、除去対象の周辺を撮影して得た画像から隠背景を推測・生成する手法(インペイント^{[4][5]})。

図 2.3、図 2.4 にそれぞれの手法を用いた隠消現実感の例を示す。図 2.3 では、隠背景を撮影するカメラ（以下、隠背景撮影カメラ）で机と椅子の裏側を撮影し、ユーザが持つカメラ付きタブレット PC で撮影した映像上に、隠背景撮影カメラで得た映像を位置合わせして投影している。図 2.4 では、除去対象周辺の植物やタイルの映像から隠背景を推測・生成している。

一般的に 1 の手法を実現するシステムは、隠背景撮影カメラと、隠消現実感の実行結果を提示するカメラ付きタブレット PC で構成される。隠背景はユーザの位置と除去対象の位置関係に合わせて変化し、それらの変化に応じて広範囲の隠背景を撮影する必要があるため、多くの場合、隠背景撮影カメラは複数台必要である^[2]。

一方、2 の手法を実現するシステムは、隠消現実感の実行結果を提示するカメラ付きタブレット PC のみで構成される場合が多い。

原子力発電所内の見通しの悪い箇所での接触事故のリスクを低減するには、ユーザが除去対象の裏側で実際に起こっていることをリアルタイムで観察する必要がある。2

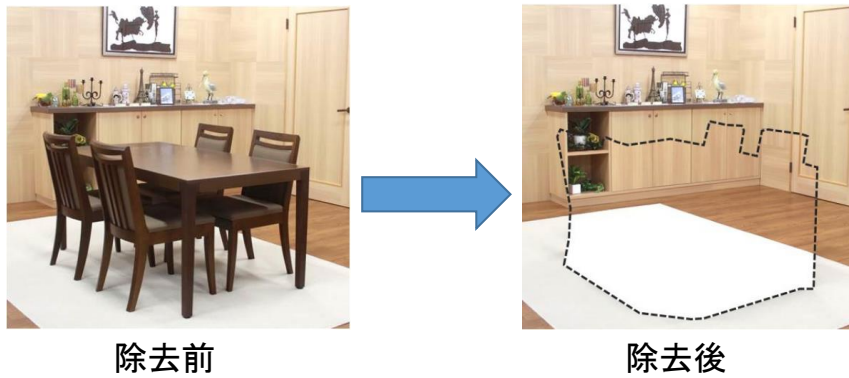
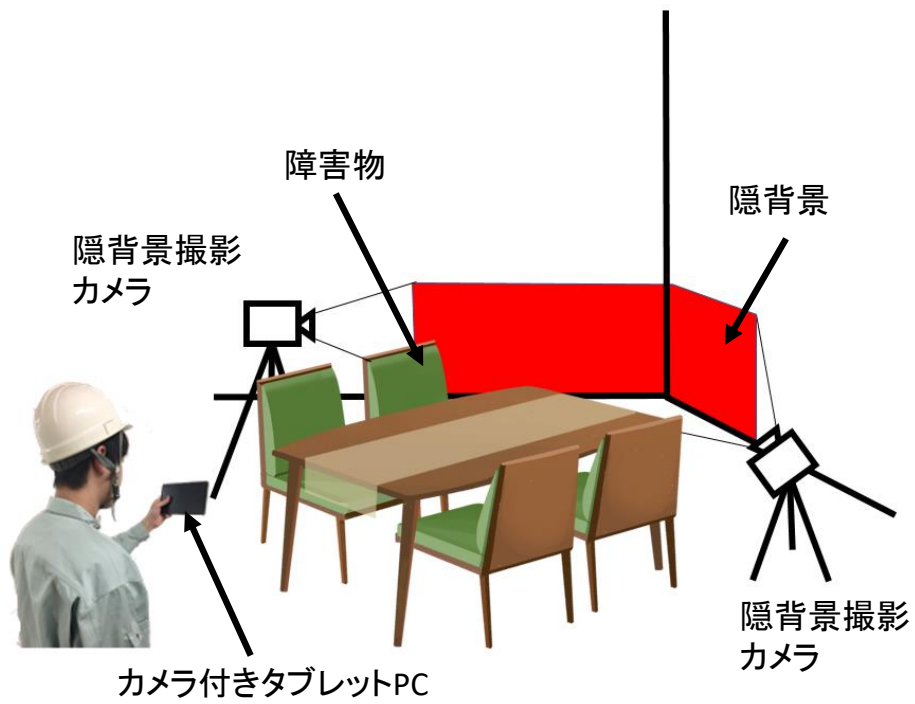


図 2.3: 隠背景のリアルタイム撮影による隠消現実感の例 [3]

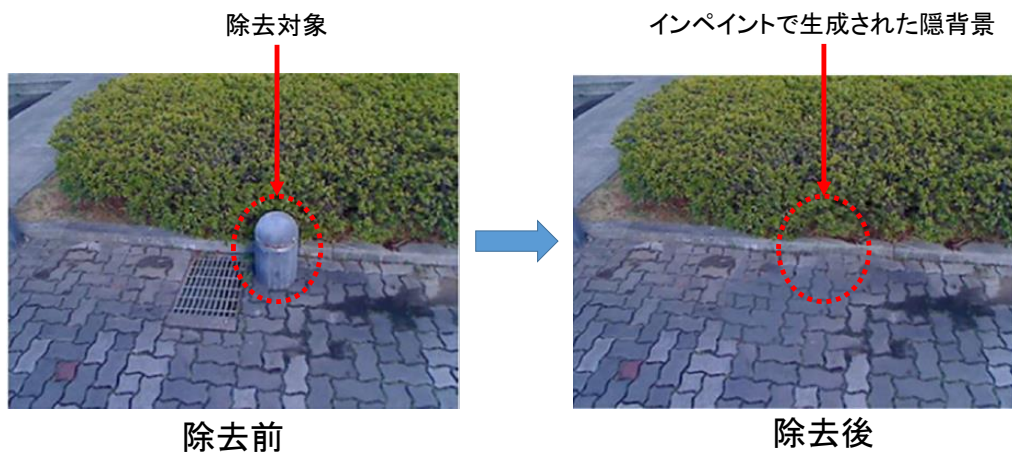


図 2.4: インペイントを用いた隠消現実感の例 [5]

の手法では、除去対象の周辺情報から隠背景を推測しており、除去対象の裏側で実際に起こっていることを確実に観察できるとは限らないため、原子力発電所内での接触事故リスク低減のための利用には適していない。一方、1の手法では、除去対象の裏側で実際に起こっていることをリアルタイムで観察できるため、原子力発電所内での接触事故リスク低減を目的とした利用に適している。

しかし、原子力発電所内には配管やタンクなどの視覚的障害物が数多く存在し、カメラを設置できる箇所の候補の数も多い。また、原子力発電所内の物体は複雑な形状をしたものが多く、その表面にカメラを設置できるかどうかを判断することが困難である。そのため、1の手法には、隠背景撮影カメラを設置する位置の判断が困難であるという問題がある。カメラを不適切な場所に設置した場合、可視化したい隠背景を適切に撮影できない可能性がある。そのため、隠消現実感を原子力発電所内部で利用可能にするためには、隠背景撮影カメラの適切な配置を自動的に求め、ユーザに提示するシステムを実現するなどの支援が必要である。

2.2 カメラの配置探索に関する既往研究

カメラの配置を決定するにあたり、カメラの台数が多く、配置候補も多い場合、その組み合わせの数が膨大となり、最適解を求めるのに莫大な時間を要する^[6]。そこで、このような組み合わせ最適化問題では、近似解（以下、準最適解）を採用することが多い。これは、最適解と準最適解の差が無視できるほど小さく、かつ準最適解を求めるのに要する時間が最適解のそれと比較してかなり短い場合に有効である。

組み合わせ最適化問題の準最適解を求める手法の1つに、遺伝的アルゴリズムがある。遺伝的アルゴリズムとは、生物の遺伝と進化のメカニズムを工学的にモデル化した手法である^[7]。過去には、遺伝的アルゴリズムを用いてカメラの準最適配置を求める手法が開発されている^{[6][8][9]}。Xincongら、およびJinwooらは、建設現場での監視カメラの配置の最適化、およびカメラのコストの最適化の2種の問題を複合した、多目的問題を解くアルゴリズムを考案した^{[6][8]}。またAzeddineらは、モーショントラッキングに使用するカメラの最適配置を求めるアルゴリズムを考案した^[9]。しかし、これらのアルゴリズムは、比較的単純な環境での使用を想定している。そのため、原子力発電所のような複雑で入り組んでいる環境で、これらのアルゴリズムをそのまま適用するのは難しい。また、隠背景の撮影のためのカメラ配置は、隠背景とユーザの位置関係を考慮して決定する必要があるが、上述したアルゴリズムではこの点を考慮して

いない。

隠消現実感を原子力発電所の保守作業支援に応用する既往研究は少なく、そのため隠背景撮影カメラの配置探索手法に関する既往研究も少ない。

2.3 研究の目的と意義

本研究では、原子力発電所内で利用することを想定した、隠背景撮影カメラの配置探索手法を開発することを目的とする。以降、本研究で開発する手法を、DR-CAPE(Diminished Reality CAmera Placement Explorer)と呼ぶ。

本研究の目的が達成されれば、原子力発電所内での隠背景撮影カメラの設置位置の判断が困難であるという問題が解決され、容易に隠消現実感が利用可能になる。その結果、衝突事故のリスクが低減され、保守作業の安全性が向上すると期待される。また本研究で開発する手法は、原子力発電所内で監視カメラを設置する際の配置決定にも応用できると考えられる。

第 3 章 隠背景撮影カメラ配置探索手法の提案

本章では、本研究で開発する隠背景撮影カメラの配置探索手法 (DR-CAPE) について述べる。まず、DR-CAPE の目的、開発する上での前提条件を述べ、その後、DR-CAPE の処理の流れについて述べる。

3.1 DR-CAPE の目的

本研究で開発する DR-CAPE は、原子力発電所内での隠背景撮影カメラの準最適配置を求めることを目的とする。なお、本手法では、隠背景撮影カメラの準最適配置を求める際、カメラを設置する位置だけでなく、方向も考慮する。以下では、カメラの位置および方向をまとめて、姿勢と表現する。本手法の実現により、原子力発電所内での隠背景撮影カメラの設置位置の判断が困難であるという問題の解決を目指す。

3.2 DR-CAPE を開発する上での前提条件

本節では、DR-CAPE を開発する上での前提条件について述べる。前提条件は以下の 3 つである。

- DR-CAPE を実行する環境に関する前提条件
- 環境に配置する隠背景撮影カメラに関する前提条件
- 隠消現実感で可視化する領域とユーザが移動する領域に関する前提条件

以下では、それぞれの詳細を述べる。

3.2.1 DR-CAPE を実行する環境に関する前提条件

本手法は、以下に示す条件を満たす原子力発電所内の環境で利用することを前提とする。

前提条件 (1) 配管・タンクなどの設備が多く設置されている。

前提条件 (2) 環境内の物体およびその位置が変化しない。

前提条件 (3) 十分に明るい環境である。

前提条件 (4) 環境の大きさは、数 10m 四方、高さ数 m 程度とする。

なお、前提条件 (4) は、原子力発電所内の 1 室の平均の大きさから決定した。

3.2.2 環境に配置する隠背景撮影カメラに関する前提条件

隠背景撮影カメラを環境に設置する方法として、カメラを固定した三脚を設置する方法やカメラを取り付けたドローンを作業領域周辺で飛行させる方法、原子力発電所内の壁や設備に固定する方法が挙げられる。隠消現実感とは原子力発電所内での作業中に利用することを想定するため、作業の邪魔にならないように隠背景撮影カメラを設置しなければならない。三脚にカメラを固定する方法は、三脚が作業の邪魔になりやすく、作業員や機材が三脚と接触する恐れがあることから、原子力発電所内で隠消現実感を実行する際には適していない。また、ドローンを飛行させる方法は、ドローンの飛行で生じる風によって、周囲の粉塵が環境中に飛散する可能性がある。さらに、三脚と同様に接触の危険性があり、安全性の確保が別途必要になるため、原子力発電所内で隠消現実感を実行する際には適していない。

一方、原子力発電所内の壁や設備に隠背景撮影カメラを設置することは、作業の邪魔になりにくく、環境中の粉塵も飛散しないことから、原子力発電所内で隠背景撮影カメラを設置する方法として適している。そのため、本手法では、隠背景撮影カメラを原子力発電所内の壁や設備に固定することを想定する。また、原子力発電所内で使われている鋼材の形状は、図 3.1 に示すように、平面や円柱であることが多い^[10]。以上から、本手法では隠背景撮影カメラを、平面上および円柱の側面上に固定することを前提とする。また、本手法では、複数の隠背景撮影カメラを使用し、図 3.2 に示すように、それぞれのカメラは設置時に方向を調整できるものとする。

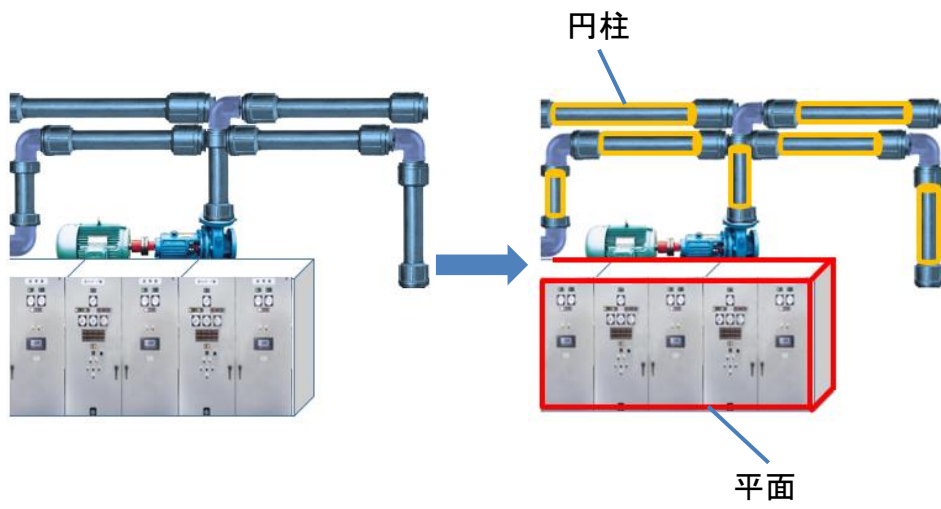


図 3.1: 平面および円柱側面の検出例

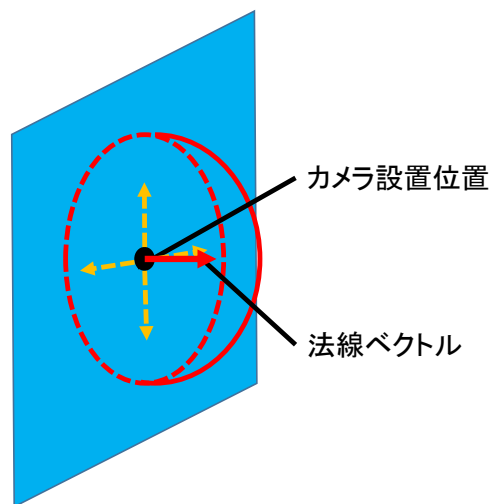


図 3.2: カメラの回転できる範囲

3.2.3 可視化する領域とユーザが移動する領域に関する前提条件

隠消現実感では、ユーザが観察したい隠背景を、あたかも除去対象を透過して観察しているかのようにユーザに提示する。そのため、隠背景撮影カメラは、ユーザが隠背景を観察している方向と同じような方向から撮影するように配置する必要がある。図 3.3(a) に隠背景を適切に撮影できるカメラ配置の例を、図 3.3(b) に隠背景を適切に撮影できないカメラ配置の例を示す。図 3.3(a) 中の隠背景撮影カメラ A で撮影した場合、ユーザが観察している方向と同じような方向から撮影できているため、除去対象を透過しているような映像を適切に生成することができる。しかし、図 3.3(b) 中の隠背景撮影カメラ B で撮影した場合、ユーザが観察している方向とは異なる方向から撮影しているため、除去対象を透過しているような映像を生成できない。

このように、隠背景撮影カメラの配置を決めるにあたっては、可視化する領域だけでなく、ユーザの位置および隠消現実感の実行中にユーザが移動する領域も考慮する必要がある。そこで、本手法では、DR-CAPE を実行する前に、隠消現実感で可視化したい領域 (以下、可視化対象領域) と、ユーザが隠消現実感を実行中に移動する領域 (以下、ユーザ移動領域) の 2 種類の領域を、DR-CAPE の入力情報としてあらかじめ設定する。図 3.4 に、可視化対象領域、ユーザ移動領域の例を示す。

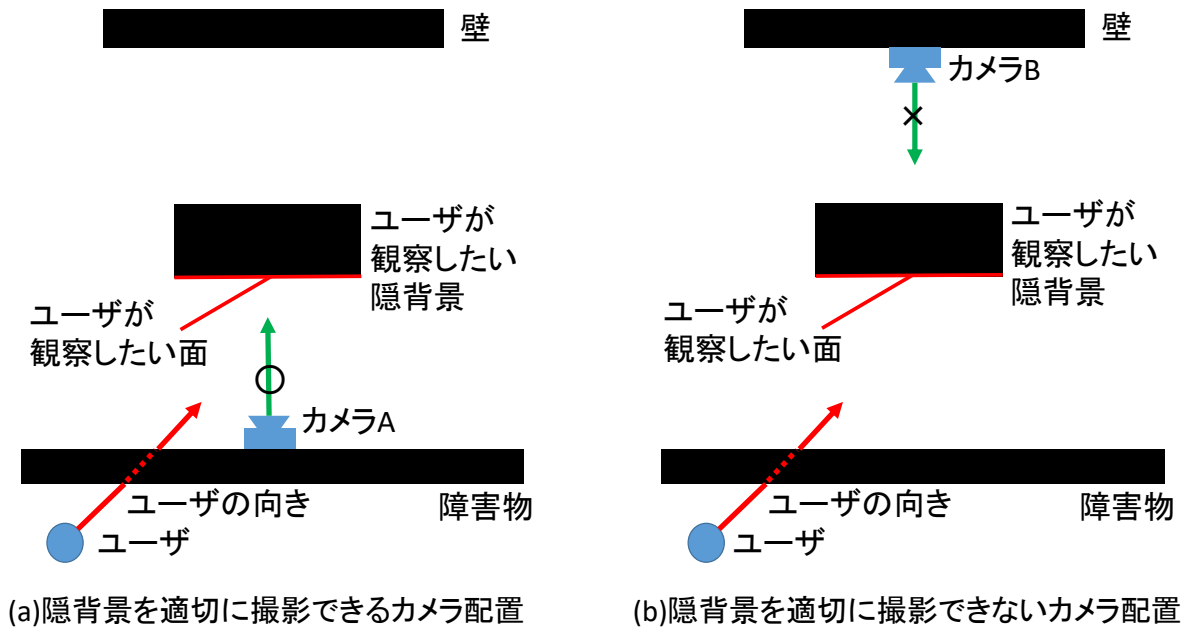


図 3.3: (a) 隠背景を適切に撮影できるカメラ配置および (b) 隠背景を適切に撮影できないカメラ配置の例 (真上から観察した図)

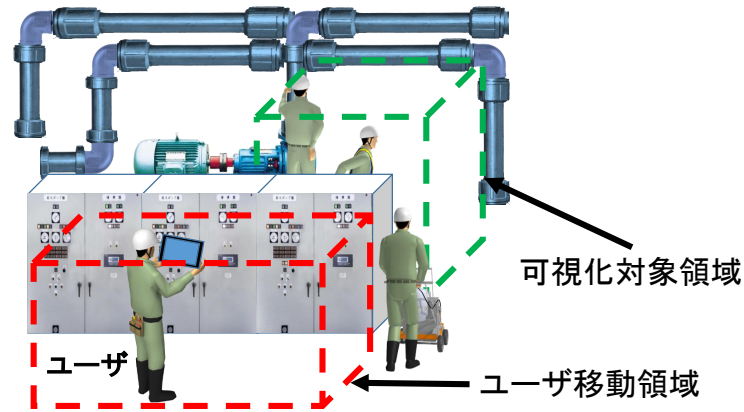


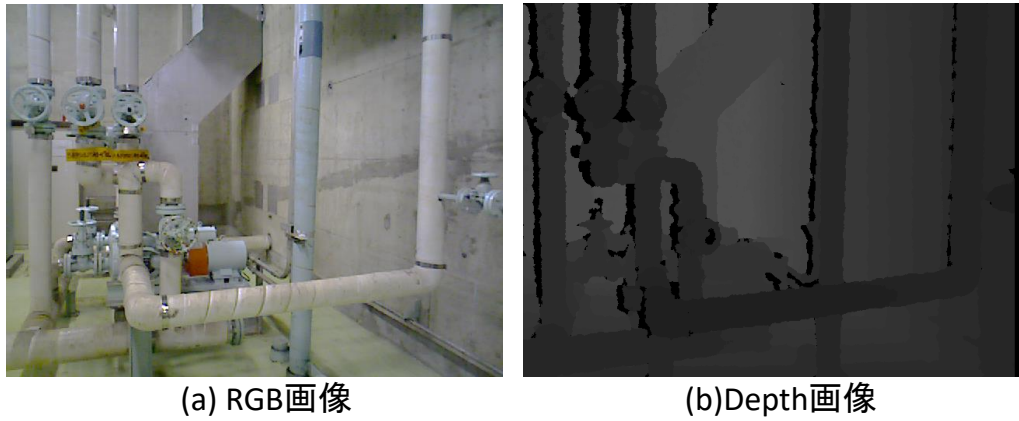
図 3.4: 可視化対象領域とユーザ移動領域の例

3.3 DR-CAPE の処理の流れ

3.3.1 DR-CAPE の処理の概要

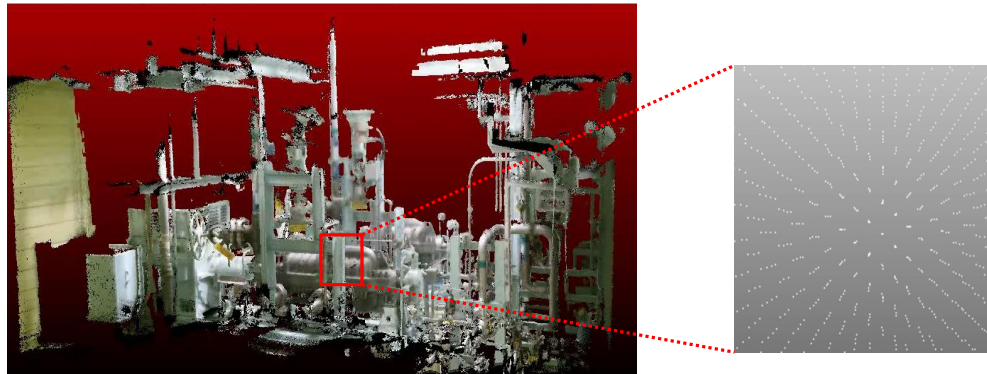
DR-CAPE では、環境の表面形状の情報源として、環境の 3 次元点群モデル (以下、点群モデル) を入力とする。本研究では、RGB-D カメラで環境を撮影して得た画像 (以下、RGB-D 画像) を元に、Structure from Motion (以下、SfM)^[11] を用いて点群モデルを生成し、利用することを想定する。RGB-D カメラとは、図 3.5(a) に示す RGB 画像に加えて、図 3.5(b) に示すような、カメラから被写体までの距離を表す Depth 画像を同時に得られるカメラである。一方、SfM とは、視点の異なる複数枚の画像から、被写体の点群モデルなどの 3 次元形状を生成する手法である。SfM を用いて環境の 3 次元形状を生成する際、各カメラ画像を取得した時のカメラの位置と方向 (以下、カメラパス) も得ることができる。DR-CAPE ではこの SfM を用いて得られるカメラパスも処理の入力とする。図 3.6 および図 3.7 に、それぞれ点群モデルの例、カメラパスの例を示す。

図 3.8 に、DR-CAPE の主要な処理ステップを示す。DR-CAPE では、まず点群モデルを利用して、十分平坦で一定の閾値以上の面積がある平面の箇所を、隠背景撮影カメラが設置可能な位置として環境中から抽出する (以下、この処理をカメラ設置可能位置抽出処理と呼ぶ)。次に、事前に設定した可視化対象領域、ユーザ移動領域を元に、隠背景を適切に撮影できるカメラ配置を求める (以下、この処理をカメラ配置探索処理と呼ぶ)。以下では、カメラ設置可能位置抽出処理およびカメラ配置探索処理の詳細を述べる。



Copyright (C) 2020 Japan Atomic Energy Agency

図 3.5: RGB-D カメラで撮影して得られる (a)RGB 画像および (b)Depth 画像の例



Copyright (C) 2020 Japan Atomic Energy Agency

図 3.6: 点群モデルの例

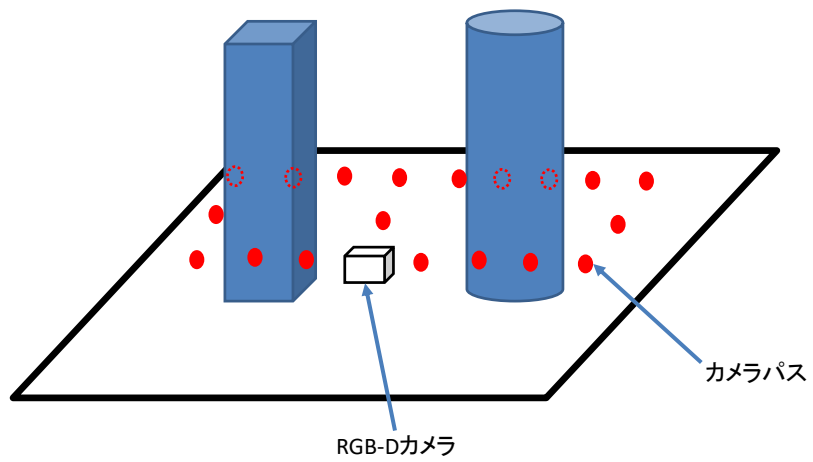


図 3.7: カメラパスの例

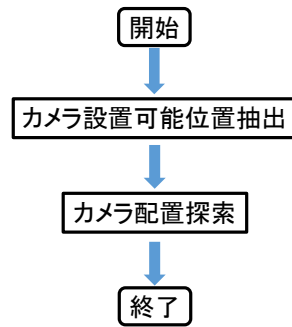


図 3.8: DR-CAPE の主要な処理ステップ

3.3.2 カメラ設置可能位置抽出処理の詳細

3.2.2 項で述べたように、本手法では、原子力発電所内の平面上および円柱の側面上に隠背景撮影カメラを設置することを想定する。原子力発電所内の円柱には、細い配管のような曲率の大きいものや、大型タンクのように曲率が小さいものが存在する。隠背景撮影カメラはバッテリーなどを内蔵する必要があるため、ある程度の重量があることから、曲率が大きい曲面の表面に固定することは困難であるため、本研究では円柱の中でも曲率の小さいものの表面に隠背景撮影カメラを設置することにする。曲率の小さい円柱の表面は、図 3.9 に示すように平面の集合で近似できる。したがって、ある程度の誤差を許して環境の点群モデルから平面を認識すれば、壁などの平面だけでなく、曲率の小さい円柱の表面も同時に認識できる。そのため、本研究では円柱を認識するための手法は特に用いず、平面を認識する手法のみを用いることとする。

図 3.10 に、カメラ設置可能位置抽出のフローを示す。カメラ設置可能位置抽出処理を開始すると、まず事前取得した点群モデルおよびカメラパスをファイルから読み込む。次に、モデルに含まれている平面を検出し、検出した各平面上の、カメラの設置が可能な広さをもつ位置を抽出する。その後、検出した各平面の表面と裏面のうち、カメラを設置できる面を検出する。最後に、カメラを設置できる位置と、その位置の設置面の法線ベクトルを求める。なお、本手法では、3.2.2 項で述べたように、床面はカメラを設置すると作業の邪魔になることから、カメラが設置可能な平面としない。また、天井もカメラの設置が困難であることから、カメラが設置可能な平面としない。

以下では、平面の検出処理、検出した各平面上のカメラ設置位置候補の抽出処理、検出した各平面のカメラを設置できる面の検出処理の詳細を述べる。

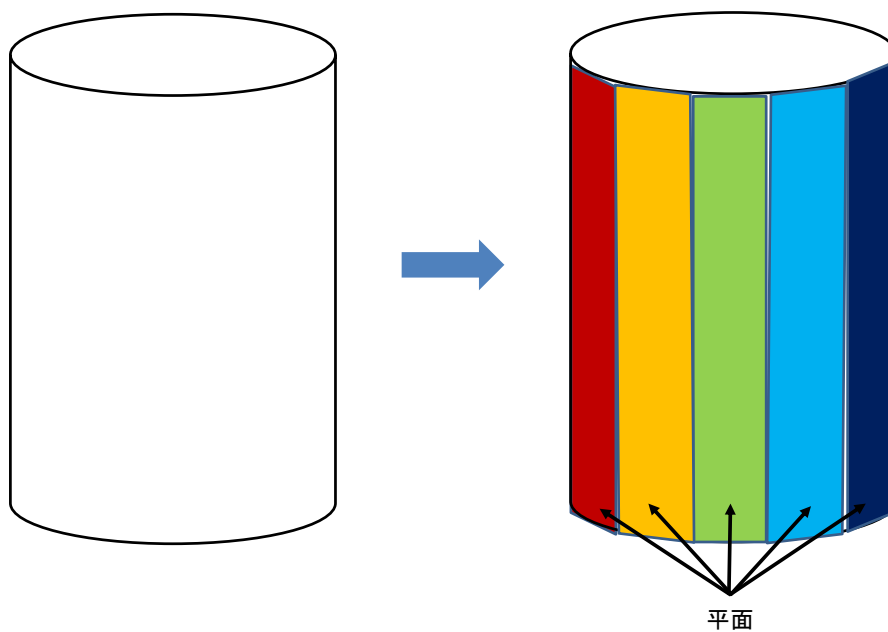


図 3.9: 平面の集合とみなした円柱の例

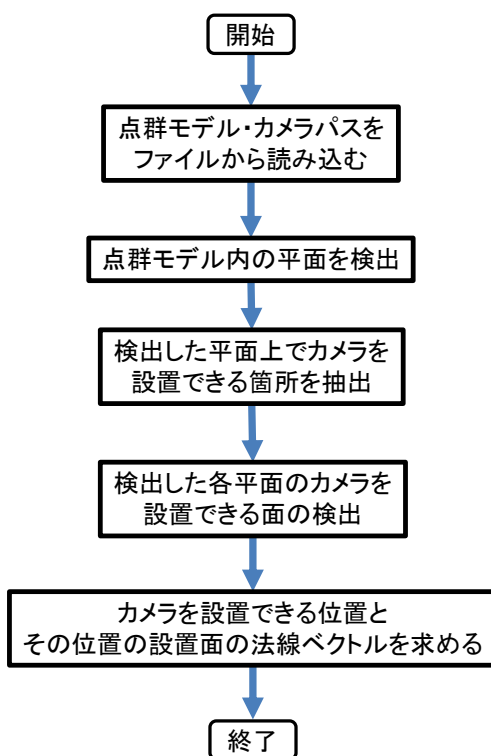


図 3.10: カメラ設置可能位置抽出処理のフロー

3.3.2.1 平面の検出

図 3.11 に、平面検出処理のフローを示す。まず、点群モデルを読み込み、平面を条件とした Region Growing を用いて、点群モデルをクラスタリングする。Region Growing とは、ランダムに選んだ点を起点として、条件を満たす隣接点を順次取り込んでいき、点群のクラスタを作成する手法である^[12]。点を取り込む条件を平面を満たすべき条件に設定することにより、ノイズが含まれる点群から平面を構成する点群を抽出できる。図 3.12 に、Region Growing によるクラスタリングの例を示す。その後、Region Growing によるクラスタリングで生成された各クラスタから、RANSAC を用いて平面を検出する。RANSAC とは、ランダムなサンプリングと評価を複数回繰り返すことで、外れ値が含まれているデータ群から安定して目的のモデルを検出する手法であり、線分や平面などの検出に用いられる^[13]。図 3.13 に、RANSAC を用いて 2 次元点群から直線を検出する例を示す。

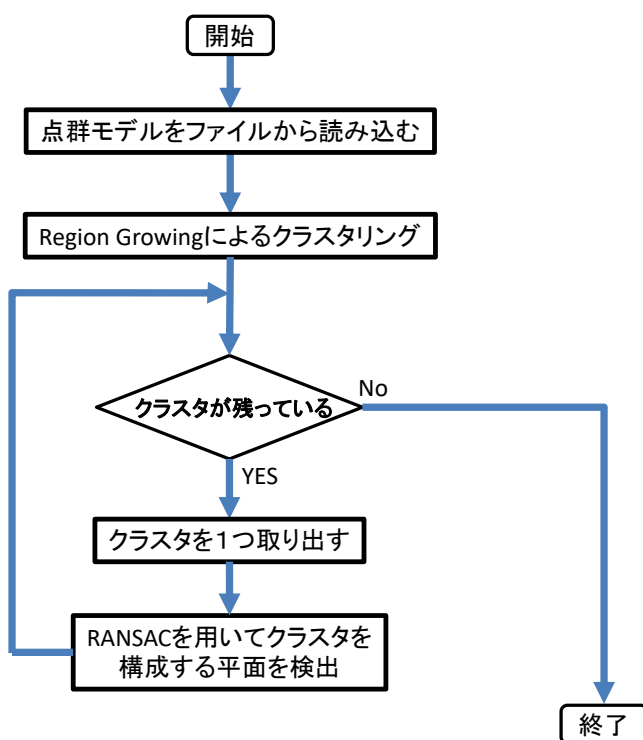


図 3.11: 平面検出処理のフロー

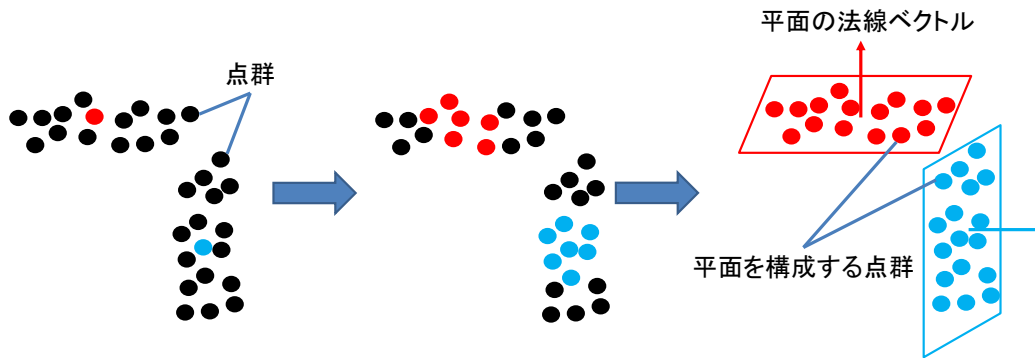


図 3.12: Region Growing によるクラスタリングの例

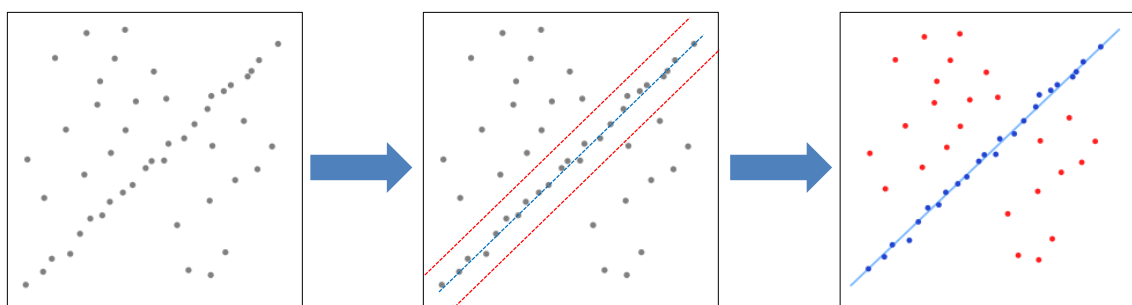


図 3.13: RANSAC による直線検出の例^[14]

3.3.2.2 カメラ設置位置候補の抽出

RANSAC で検出される平面は無限平面であるため、3.3.2.1 条で述べた平面検出処理の後、図 3.14 に示すように、無限平面から有限平面を求める。次に、図 3.14 に示すように、検出した平面を、カメラが設置できる程度の大きさにグリッド分割することで、カメラを設置できる可能性がある位置を離散化し、有限の可能性の中から準最適なカメラ配置を求める。これは、認識された平面の大きさが隠背景撮影カメラを設置するのに必要な面の大きさよりも大きい場合、位置を少しずらすだけで別の位置になるので設置の仕方はほぼ無限に存在し、これをそのまま処理して最適なカメラ配置を解析的に求めることは困難なためである。

図 3.15 に、3.3.2.1 条で述べた平面検出処理を用いて検出した無限平面から、カメラ設置位置候補を抽出するフローを示す。本手法では、検出された無限平面上で、大きな欠落なく点が存在しているグリッドをカメラの設置位置候補とする。そのためまず、図 3.16 に示すように、RANSAC で検出された無限平面に属する点群を、全てその無限平面上に投影する。その後、投影された点群を内包する長方形を求めることで、カメラが設置可能な有限平面を取得する。具体的には、点群を無限平面に投影後、図

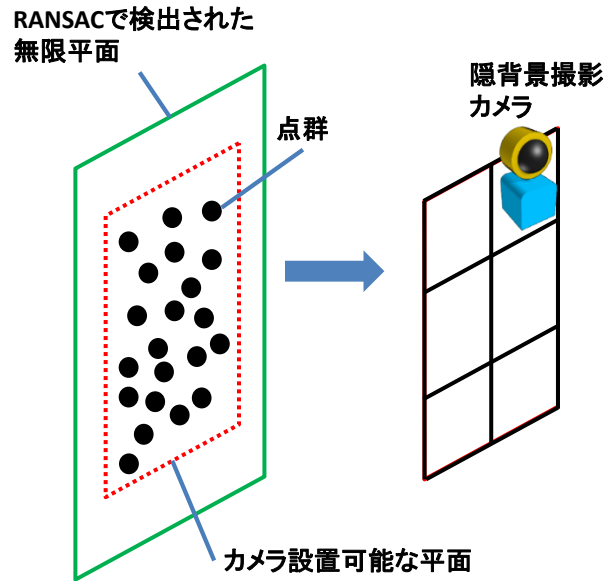


図 3.14: 検出した平面のグリッド分割の例

3.16 に示すように、平面上に X 軸、 Y 軸を設定し、 X 座標、 Y 座標の最小値をそれぞれ X_{min} 、 Y_{min} とし、 X 座標、 Y 座標の最大値をそれぞれ X_{max} 、 Y_{max} とする。それらの 2次元座標 (X_{min}, Y_{min}) 、 (X_{max}, Y_{max}) を端点とする線分を対角線として持つ長方形を、求める長方形とする。なお、図 3.17 に示すように、平面の法線ベクトルおよび環境の鉛直方向ベクトルと直行するベクトルを X 軸とし、平面の法線ベクトルおよび X 軸と直行するベクトルを Y 軸とする。

次に、求めた長方形を、図 3.14 に示すようにグリッド分割し、各グリッド上にカメラが設置可能か判定する。図 3.18 に、グリッドのカメラ設置可否判定のフローを示す。本手法では、大きな欠落なく点が存在する領域をカメラが設置可能な位置とするため、各グリッドに十分な数の点が存在するかどうかで、そこにカメラが設置可能か判定する。具体的には、まず、グリッドを 3×3 の小グリッドに分割する。その後、各小グリッド内に点が存在するか判定する。もし、9個の小グリッドの中で、内側に点が存在する小グリッドの個数が閾値以上存在する場合、カメラを設置できるグリッドと判定する。図 3.19 に、平面上のカメラが設置可能なグリッドとカメラが設置不可能なグリッドの例を示す。なお、本研究では、グリッドの分割数の候補をいくつか設け、それぞれの候補で試行した結果を元にグリッドの分割数を決定した。

最後にカメラを設置できると判定された各グリッドの中心の位置と、グリッドの法線ベクトルを出力する。

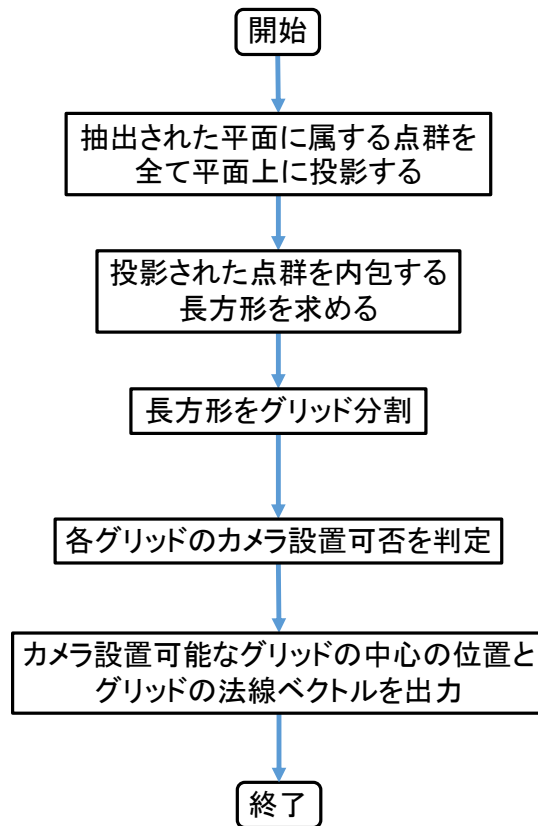


図 3.15: 検出した平面上のカメラ設置位置候補抽出のフロー

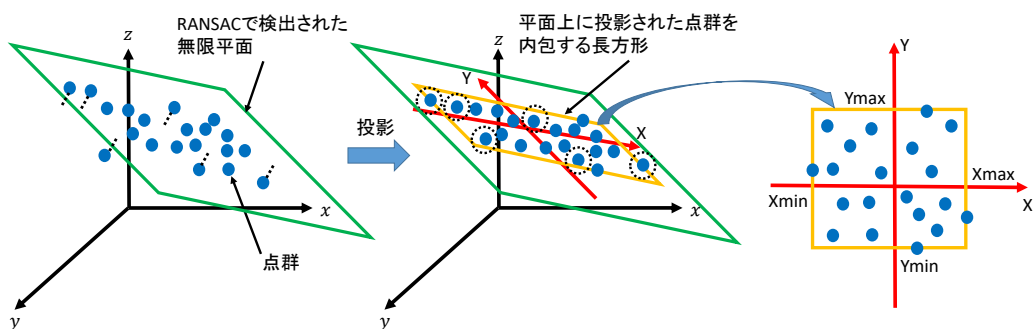


図 3.16: 検出された無限平面への点群投影の例

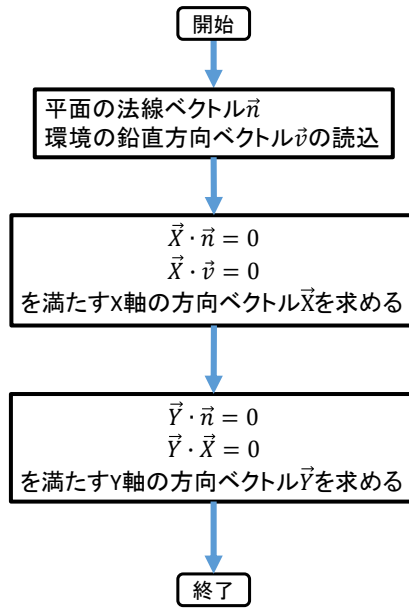


図 3.17: X 軸および Y 軸の設定のフロー

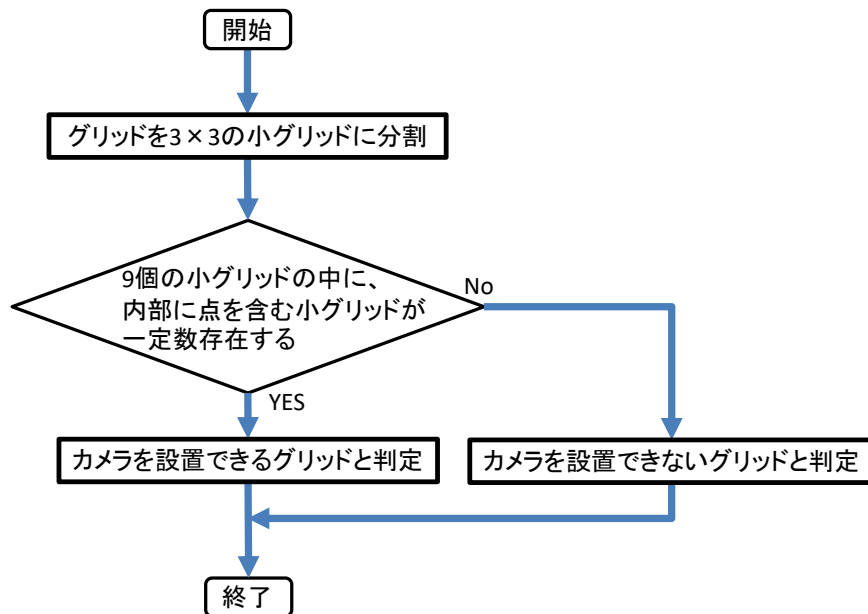


図 3.18: グリッドのカメラ設置可否判別のフロー

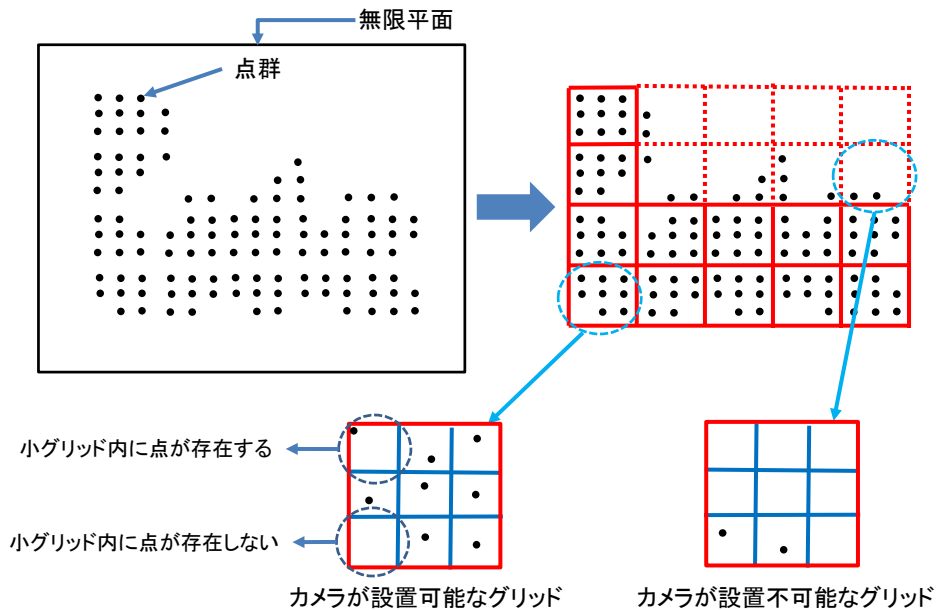


図 3.19: 平面上のカメラが設置可能なグリッドとカメラが設置不可能なグリッドの例

3.3.2.3 カメラを設置できる面の検出

RGB-D 画像に対して SfM を行って得られる点群モデルには、図 3.20 に示すように、ノイズが含まれている。そのため、図 3.21 に示すように、Region Growing と RANSAC を用いて検出した平面の中には、複数面に分かれて検出されたが実際には 1 つの平面であったり、実空間では厚さのある壁などの内部に位置していてカメラを設置できない平面などが含まれる場合がある。さらに、3.3.2.1 条で述べた手法で検出した結果だけでは、検出された平面が物の表面か裏面か区別せずに検出されている。そのため、検出された平面が厚さのある壁などであった場合に、平面の片方が壁の内側に向いていて、そちら側の平面上にはカメラを設置できない可能性もある。したがって、抽出された平面毎に、カメラが設置できる側の面を検出する必要がある。

平面の表面、裏面の中から、カメラが設置できる面を抽出するためには、各面が、属する物体の外側にあるのか、内側にあるのかを判定する元情報が必要である。本手法では、そのような情報として、SfM を実行する際に点群モデルと同時に得られるカメラパスを用いる。以下、平面の表面と裏面を区別して扱うために、図 3.22 に示すように、平面の 2 種類の法線ベクトルを、表面の法線ベクトルおよび裏面の法線ベクトルと呼称する。

図 3.23 に、平面の表面、裏面の判定のフローを示す。まず、判定する平面を入力する。このとき、3.3.2.2 条で述べた処理で求めた、平面上の各グリッドの中心の 3 次元

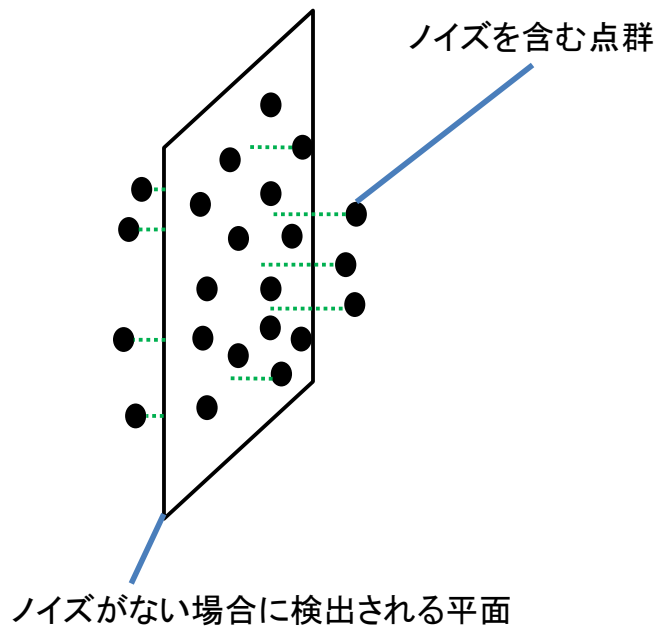
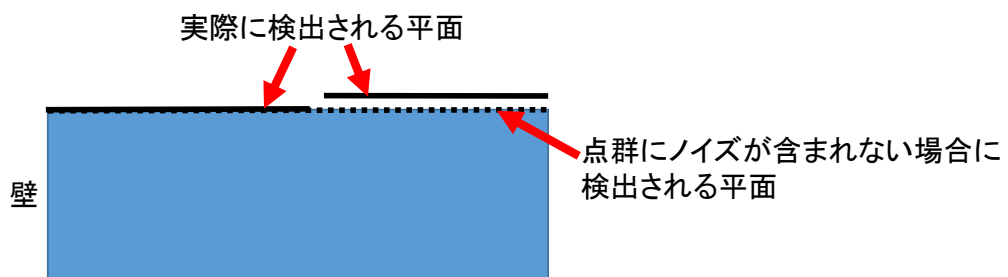
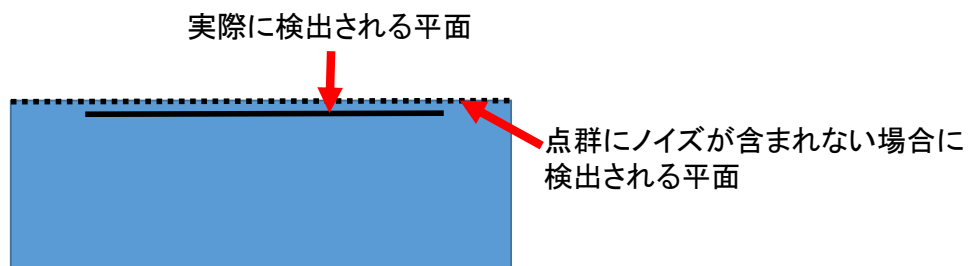


図 3.20: ノイズを含む点群の例



(a) 1枚の平面が複数枚に分かれて検出される場合



(b) 壁の内部に平面があると検出される場合

図 3.21: ノイズを含んだ点群から検出される平面の例

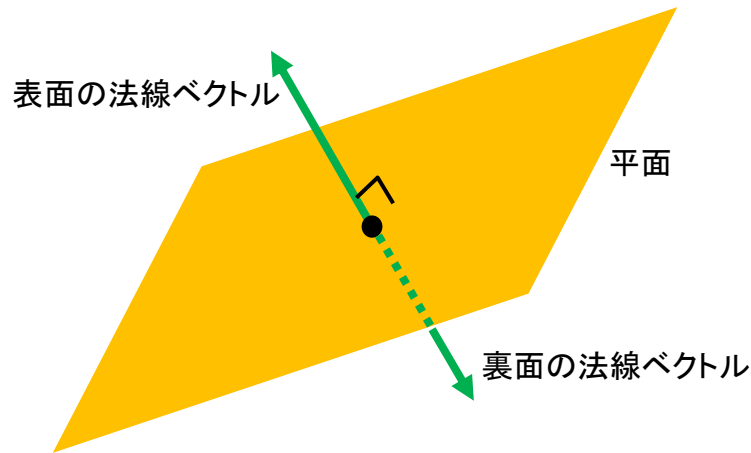


図 3.22: 平面の表面と裏面の法線ベクトルの例

座標を $\{G\} = G_1, G_2, \dots, G_p$ (p はグリッドの個数)、平面の法線ベクトルを \vec{n} 、各カメラパスの 3 次元座標を $\{P\} = P_1, P_2, \dots, P_q$ (q はカメラパスの個数) とする。

次に、全ての $i(1, 2, \dots, p)$ 、 $j(1, 2, \dots, q)$ に対して、以下の条件を満たすか調べる。

条件 (1) カメラ設置位置候補 G_i を始点、カメラパス P_j を終点とするベクトル $\overrightarrow{G_i P_j}$ と、平面の法線ベクトル \vec{n} との間に、式 3.1 が成立する。

$$\vec{n} \cdot \overrightarrow{G_i P_j} \geq 0 \quad (3.1)$$

条件 (2) 線分 $G_i P_j$ は、障害物と接触しない。

条件 (1) では、 $\overrightarrow{G_i P_j}$ と \vec{n} のなす角が 90 度より大きいかが判定し、90 度より大きい場合、図 3.23 に示すように i, j の組み合わせを変更し、条件 (1) および条件 (2) を満たすか再び判定する。これは、カメラ方向の範囲を、図 3.2 に示すように、法線ベクトルを中心とした半球内に限定しているためである。条件 (2) では、線分 $G_i P_j$ と障害物が接触するか判定することで、入力された平面がカメラを設置できる平面か判定する。図 3.24 の (a) に、線分 $G_i P_j$ が障害物と接触しない場合、図 3.24 の (b) および (c) に、線分 $G_i P_j$ が障害物と接触する場合の例を示す。図 3.24 では、三角柱の側面を平面として検出した際、その表面、裏面それぞれにカメラが設置可能か調べている。図 3.24(a) では、線分 $G_i P_j$ はどの障害物とも接触しない。一方、図 3.24(b) では、線分 $G_i P_j$ は三角柱の別の側面と接触している。また、図 3.24(c) では、線分 $G_i P_j$ は三角柱以外の物体と接触している。図 3.24(b) および (c) に示すように、線分 $G_i P_j$ が障害物と接触した場合も、 i, j の組み合わせを変更し、条件 (1) および条件 (2) を満たすか再び判定する。

線分と障害物の接触の判定には、ブレゼンハムのアルゴリズムを用いる。ブレゼンハムのアルゴリズムとは、ディスプレイ上に線分を描画するために着色するピクセルを高速に求める手法である^[15]。図3.25に、ブレゼンハムのアルゴリズムによる線分描画の例を示す。本手法では、ブレゼンハムのアルゴリズムを3次元に拡張したものを用い、接触を判定する。図3.26に、ブレゼンハムのアルゴリズムによる接触判定検出の例を示す。まず、点群モデルを含む3次元空間を、点間の最小距離と同じ間隔でグリッド分割し、次に、3次元空間上に線分 G_iP_j を描画すると想定した際に着色するグリッドを、ブレゼンハムのアルゴリズムで求める。求めたグリッドの内部に点群が存在する場合、線分 G_iP_j は障害物と接触したと判定する。

条件(1)および条件(2)を満たす i と j の組み合わせが1つでも存在する場合、カメラの設置候補面であると判定する。以上の処理を、検出した全ての平面の両面に対して実行し、最後に、カメラを設置できる平面を出力して処理を終了する。

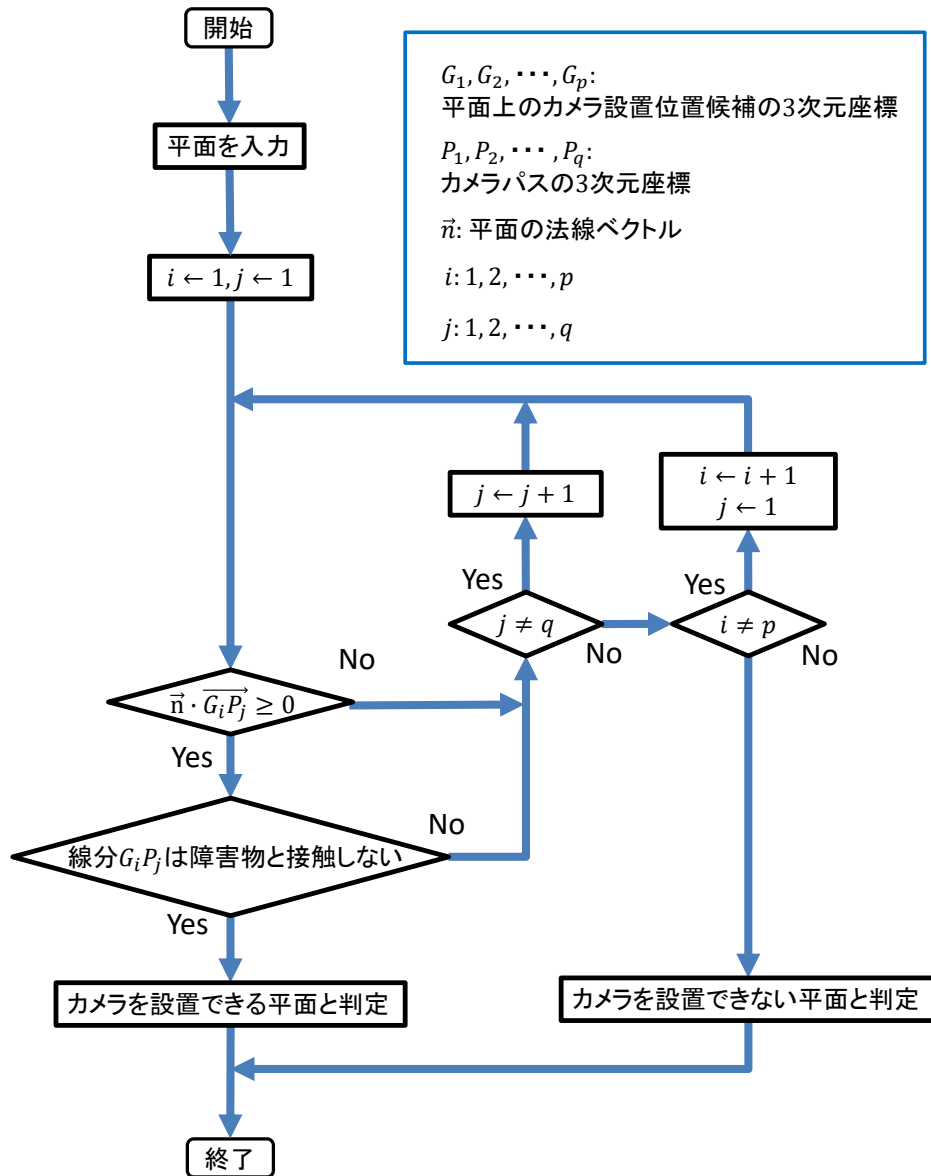
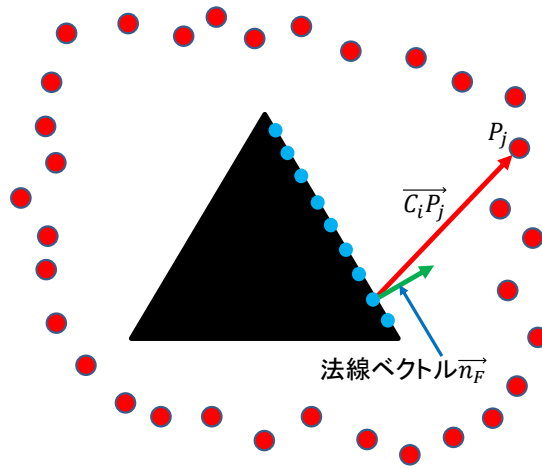
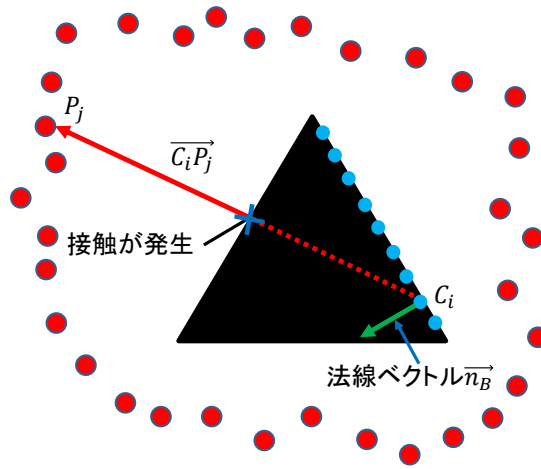


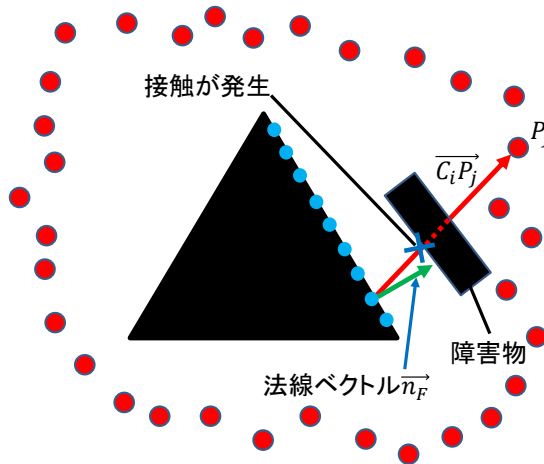
図 3.23: 平面のカメラ設置可否判定のフロー



(a) 線分 $C_i P_j$ がどの物体とも接触しない



(b) 線分 $C_i P_j$ が、 C_i の属する物体と接触する



(c) 線分 $C_i P_j$ が、 C_i の属さない物体と接触する

- カメラ設置位置候補
- カメラパス

図 3.24: 線分 $G_i P_j$ が (a) 障害物と接触しない場合、(b)(c) 接触する場合の例 (真上から見た図)

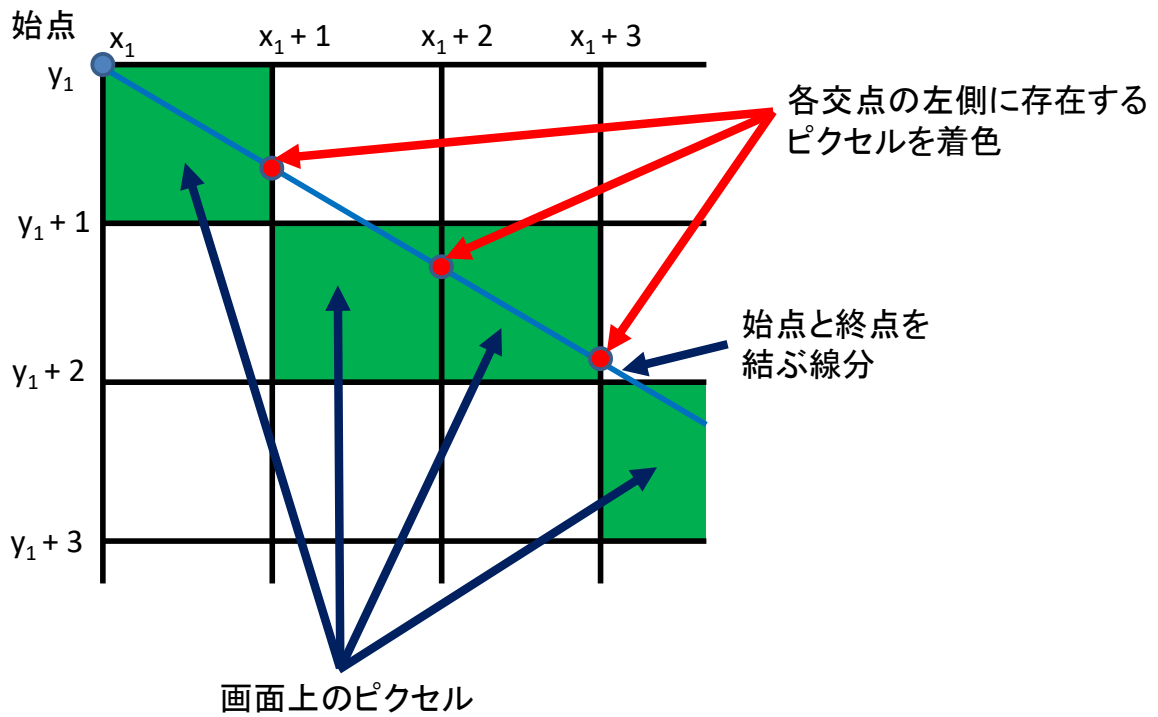


図 3.25: ブレゼンハムのアルゴリズムによる線分描画の例

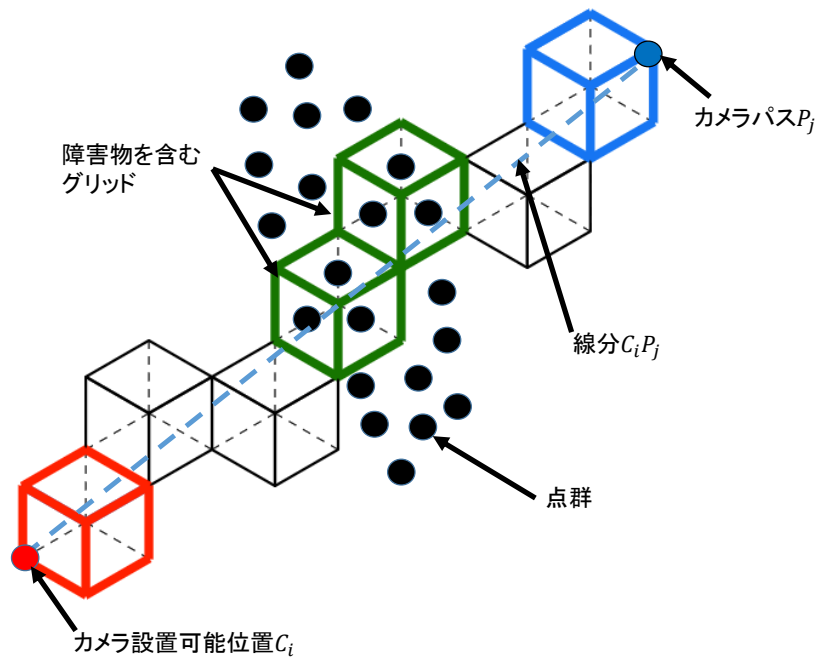


図 3.26: ブレゼンハムのアルゴリズムによる接触判定の例

3.3.3 カメラ配置探索処理の詳細

2.2節で述べた理由から、本手法では隠背景撮影カメラの準最適配置を求める手法として、遺伝的アルゴリズム (以下、GA) を用いる。本手法では、遺伝子と染色体を図 3.27 に示すように定義する。遺伝子は、カメラの設置位置の 3 次元座標、およびカメラの方向を表し、染色体はその集合を表す。なお、以下では、1 本の染色体を構成する遺伝子の数、すなわち設置するカメラの台数を r とする。

図 3.28 に、1 本の染色体の生成のフローを示す。まず、抽出されたカメラ設置可能位置の中からランダムに 1 つ選び、その位置をカメラ設置位置とする。次に、その位置でのカメラの方向をランダムに決定する。図 3.29 に示すように、本手法では、カメラの向きはパン方向、チルト方向の回転の組み合わせで決定する。具体的には、カメラを設置する平面の法線ベクトルの示す方向を基準として、まず、パン方向へどれだけ回転させるかを決定する。図 3.29(a) に示すように、カメラを回転させる角度の候補を δ 度毎に生成し、その中から 1 つランダムに選択し、その角度分カメラを回転させる。次に、チルト方向へどれだけ回転させるかを決定する。図 3.29(b) に示すように、パン方向と同様にカメラを回転させる向きの候補を生成し、その中から 1 つランダムに選択し、その角度分カメラを回転させる。以上の処理をカメラ台数分 (r 回) 行い、それぞれ選択されたカメラ姿勢の集合を 1 本の染色体とする。なお、染色体を生成する際、過去に選んだ設置可能位置と重複して選ばないようにする。

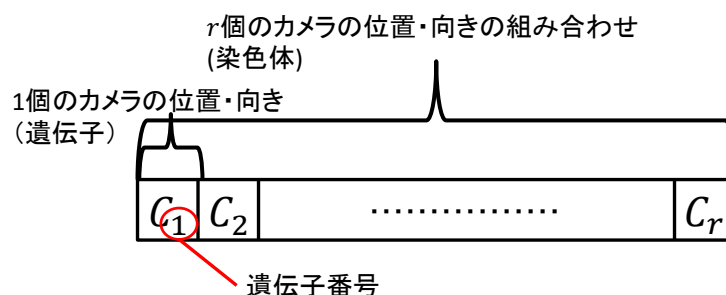


図 3.27: DR-CAPE で実行する GA の染色体と遺伝子の定義

図 3.30 に、GA を用いたカメラ配置探索のフローを示す。まず、ステップ 1 として、初期集団を構成する染色体をランダムに f 本生成する。

次に、ステップ 2 として、初期集団内の各染色体が表すカメラ配置が、隠背景をどの程度適切に撮影できているかを評価し、それぞれの染色体に評価点を与え、その結果を第 1 世代での評価点として保存しておく。カメラ配置を評価する方法の詳細は、3.3.4 項に後述する。

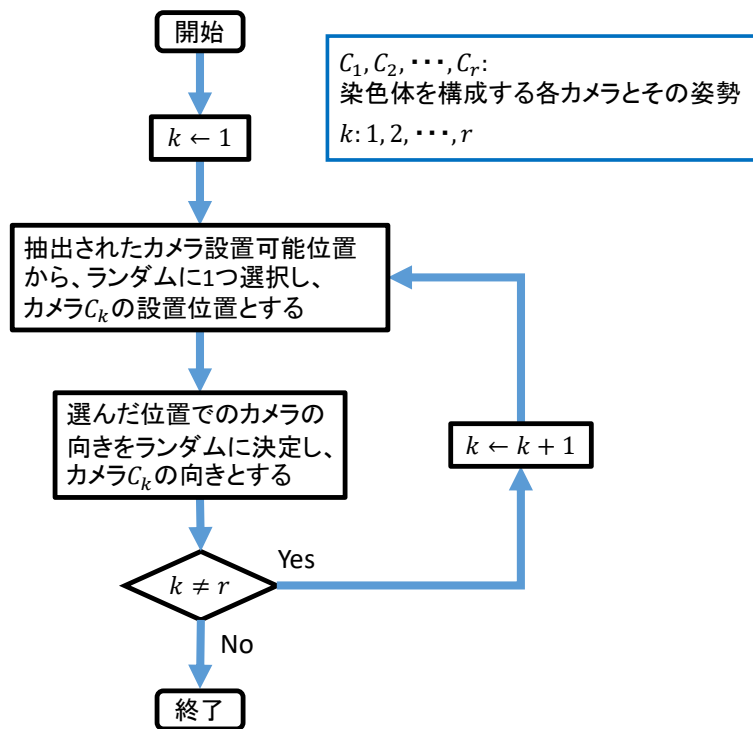


図 3.28: 1 本の染色体の生成のフロー

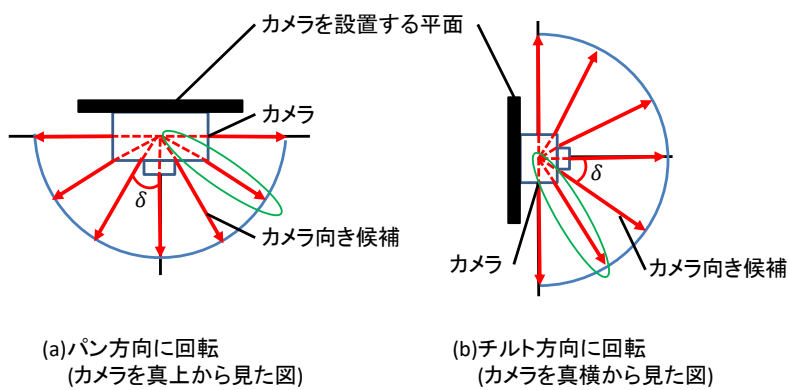


図 3.29: カメラをパン方向およびチルト方向へ回転させる角度の選択の例

その後、ステップ3として、染色体間で交叉させ、次世代の候補となる集団(以下、次世代候補集団)を生成する。交叉とは、図3.31に示すように、選択された2つの染色体間で、一部の遺伝子を入れ替え、新たな2本の染色体を生成する操作である。交叉する染色体は、ルーレット選択方式で2本選択する^[7]。ルーレット選択方式とは、染色体の持つ評価点に比例した確率で染色体を選択する方式である。これは、次世代集団を生成する際、なるべく次世代で評価点の高い染色体が多く生成されるように、現世代で評価点の高い染色体が選ばれやすくするためである。また、図3.32に示すように、交叉は f 回実行して新たな染色体を $2f$ 本生成し、それらを次世代候補集団とする。これは、次世代の候補を多めに生成し、後述する次世代集団の選別で、評価点の高い染色体を選ぶためである。

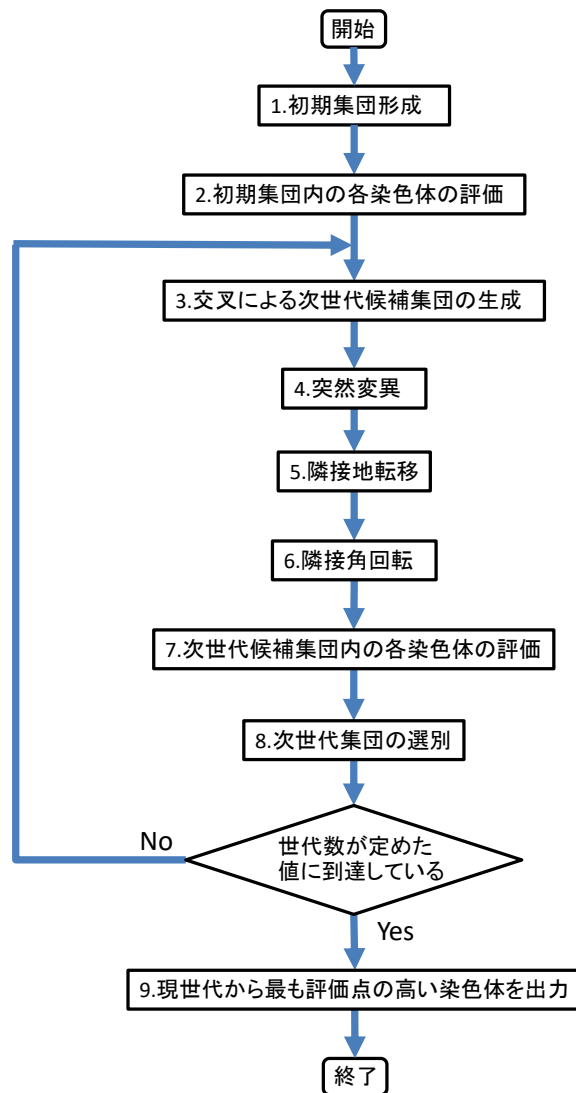


図 3.30: カメラ配置探索のフロー

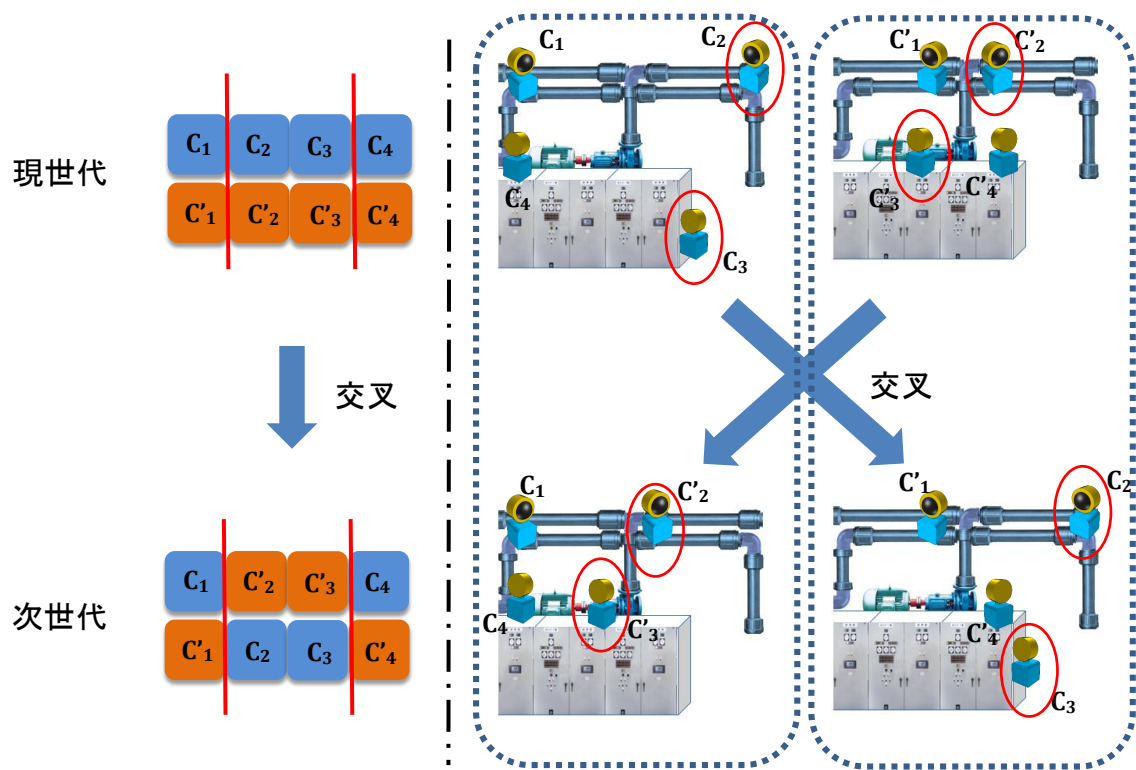


図 3.31: 2つのカメラ配置間の交叉の例

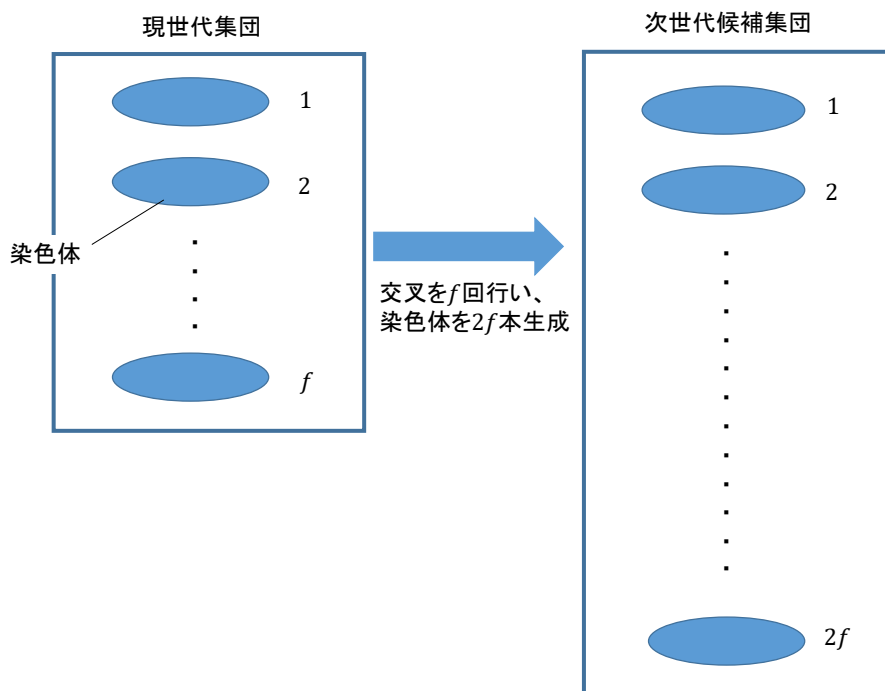


図 3.32: 次世代候補集団の生成

次に、ステップ4として、複数の染色体に対して突然変異を発生させる。すなわち、次世代候補集団内からランダムに染色体を選択し、選択された染色体内のカメラ姿勢をランダムに1個選択する。その後、選択されたカメラ姿勢を、全く別の姿勢に変化させる。図3.33に、カメラ配置の突然変異の例を示す。突然変異を発生させることで、局所的最適解に収束する可能性を減らし、より良い準最適解を探索できるようにする。

その後、ステップ5として、図3.34に示すように、複数の染色体に対して隣接地転移を発生させる。すなわち、次世代候補集団内からランダムに染色体を選択し、選択された染色体内のカメラ姿勢をそれぞれランダムに1個ずつ選択する。次に、選択されたカメラに対して、カメラが設置されているグリッドに隣接するグリッドを1つ選び、その場所にカメラを転移させる。

次に、ステップ6として、図3.35に示すように、複数の染色体に対して隣接角回転を発生させる。すなわち、次世代候補集団の中からランダムに染色体を選択し、選択された染色体内のカメラをランダムに1個選択する。選択されたカメラに対して、パン方向およびチルト方向に、それぞれ δ 度あるいは $-\delta$ 度だけランダムにカメラを回転させる。パン方向の隣接角回転では、図3.35のようにカメラを回転させる角度を選択し、その向きを新たなカメラ方向とする。パン方向の隣接角回転の後、チルト方向でも同様に隣接角回転を行う。

隣接地転移及び隣接角回転を行うのは、あるカメラ配置の評価が高い場合、その配置から撮影位置や方向を少し変化させた場合に、さらに評価が高くなる可能性が高いためである。

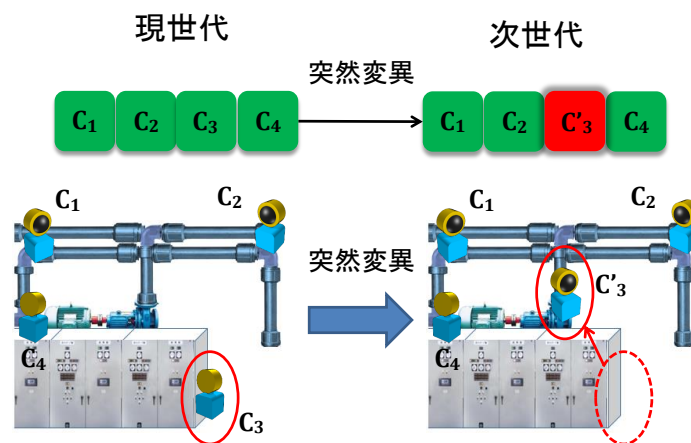


図 3.33: カメラ配置の突然変異の例

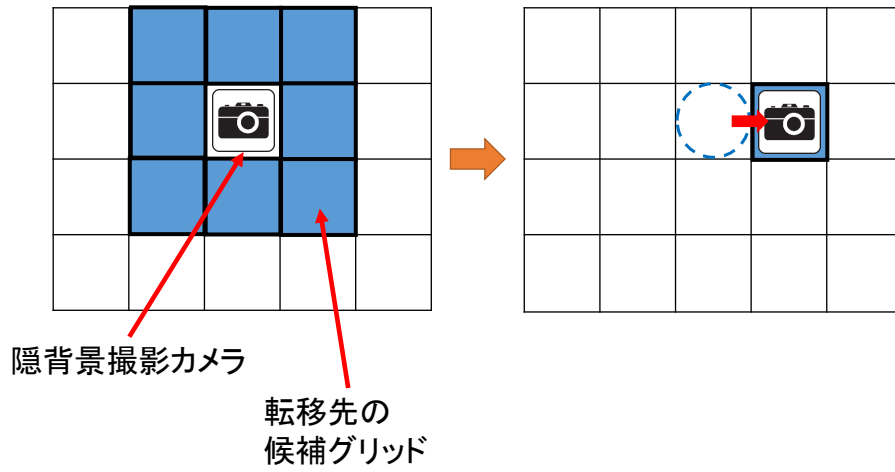


図 3.34: カメラの隣接地転移の例

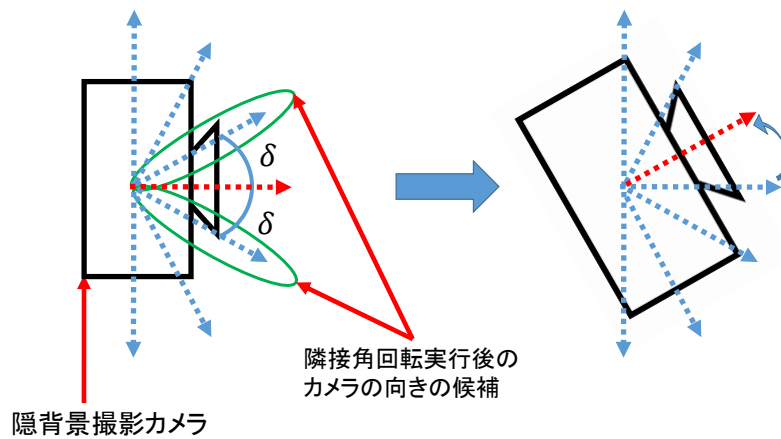


図 3.35: カメラの隣接角回転の例 (カメラを真上から見た図)

その後、ステップ7として次世代候補集団内の各染色体を評価した後、ステップ8として次世代集団を選別する。図 3.36 に、次世代集団の生成の例を示す。まず、現世代集団の中から、評価点の高い上位 g 本の染色体を選択し、次世代集団に加える。以下では、この染色体をエリート染色体と呼び、現世代集団数 f に対するエリート染色体数 g の割合を、エリート染色体割合と呼ぶ。次に、次世代候補集団内の染色体を全て評価し、評価点の高い上位 $f - g$ 本の染色体を選択し、次世代集団に加える。エリート染色体をそのまま次世代集団に加えるのは、現世代集団内の優れた染色体を残すことで、準最適解探索をしやすくするためである。

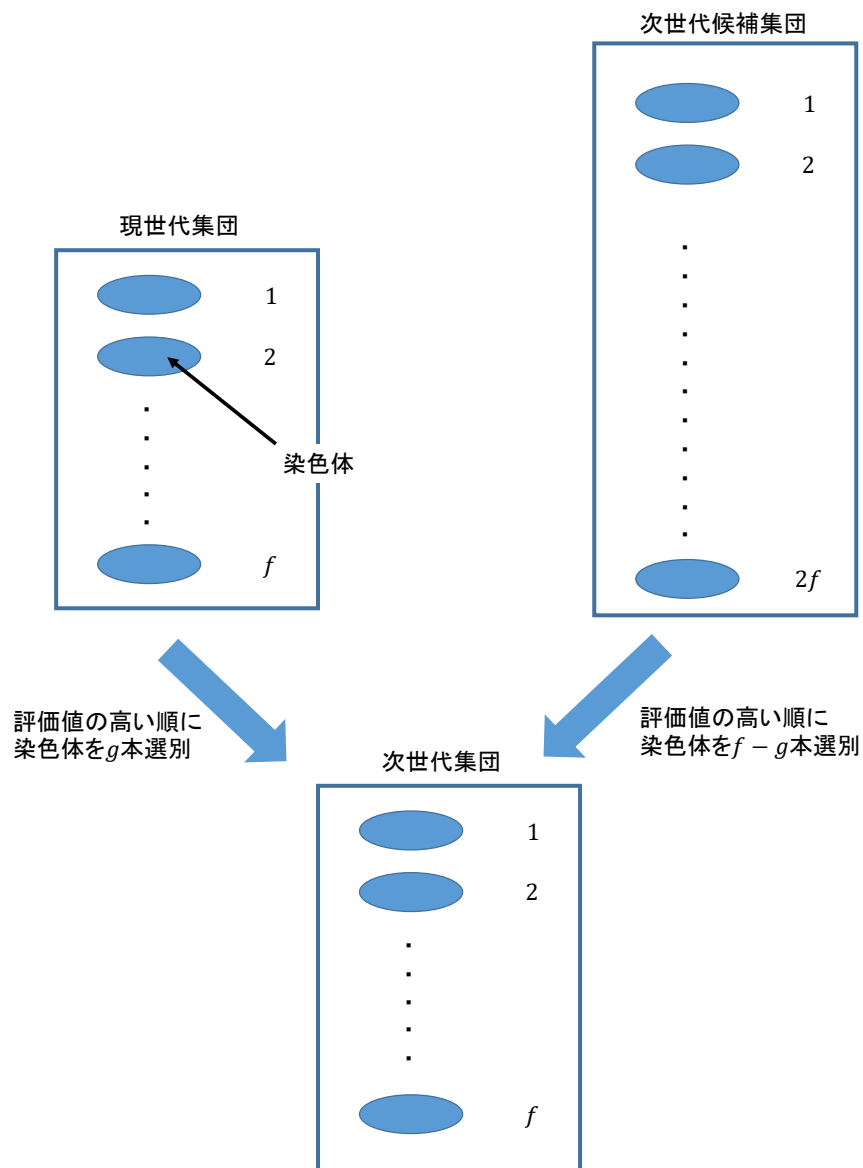


図 3.36: 次世代集団生成の例

以上の処理を1世代分の進化とし、世代数が定めた値に到達するまで、ステップ3からステップ8を繰り返し実行する。世代数が定めた値に到達した場合、ステップ9として、最後の世代に属する染色体から、最も評価点が高い染色体を出力する。

3.3.4 カメラ配置評価

本項では、3.3.3項で述べたカメラ配置探索処理において、1本の染色体の評価点を求める方法について述べる。本手法では、可視化対象領域のうち、撮影できている領域が広いカメラ配置ほど、評価点の高い配置とする。そこで、図3.37に示すように、可視化対象領域を、事前に定めた大きさの3次元グリッド(以下、可視化対象領域グリッド)に分割し、障害物に隠れてカメラで撮影できないグリッドを考慮した上で、各カメラで撮影できるグリッドを求めることで、撮影できている可視化対象領域の範囲を評価する。

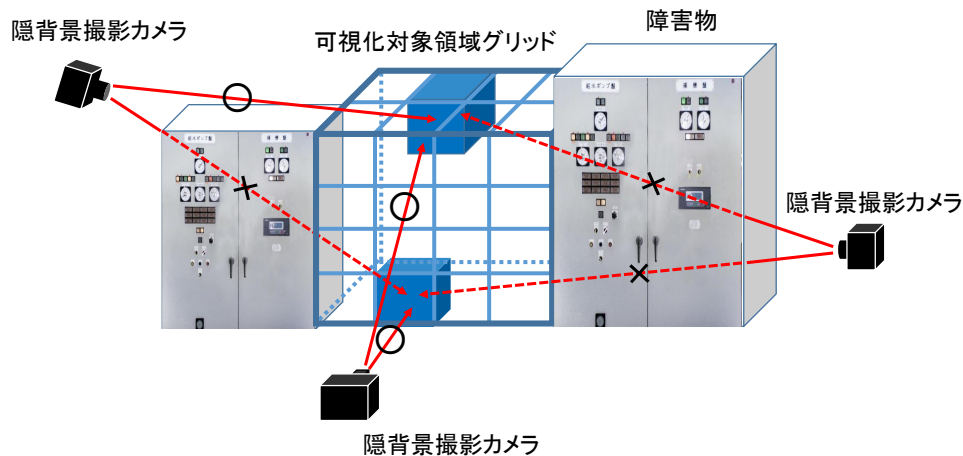


図 3.37: カメラが撮影可能な可視化対象領域グリッドおよび撮影不可能な可視化対象領域グリッドの例

3.2.3項で述べたように、カメラで隠背景を撮影する際には、ユーザが隠背景を観察する方向と同じような方向から撮影する必要がある。そのため、図3.38に示すように、可視化対象領域グリッドの面は、ユーザの位置によって、撮影すべき面、撮影する必要がない面に分けられる。また、図3.39に示すように、撮影すべき面同士でも、ユーザと可視化対象領域グリッドの位置関係によって撮影の優先度に差が生じる場合がある。例えば、図3.39の可視化対象領域グリッドの面1および面2の優先度について考える。可視化対象領域グリッドの中心を始点、ユーザの位置を終点とするベクトル(観察方向ベクトル、図3.39中の赤色の矢印)と、各面の法線ベクトルとのなす角 θ_1

および θ_2 を比較すると、 $\theta_1 < \theta_2$ であることから、面1の方がより正面に近い位置から観察でき、質が高い映像を撮影できるため、撮影の優先度を高くするべきである。本研究では、各可視化対象領域グリッドの各面に、撮影の優先度が高いものほど高い点数を設定し、カメラが可視化対象領域グリッドの面を撮影する毎に、その面に設定された点数をカメラ配置の評価点に加算する。なお、異なるカメラで同じ可視化対象領域グリッドの面を撮影した場合、片方の撮影は無駄になるため、重複して評価点は加算しない。

図 3.40 に、カメラ配置の評価点決定処理のフローを示す。以下では、カメラ配置の評価点を ES (Evaluation Score) とする。まず、評価するカメラ配置の各カメラの姿勢を $\{C\} = C_1, C_2, \dots, C_r$ (r はカメラの個数) とする。次に、図 3.41 に示すように、可視化対象領域を事前に定めた大きさの 3次元グリッドに分割し、それぞれのグリッドの中心の 3次元座標を $\{V\} = V_1, V_2, \dots, V_s$ (s は可視化対象領域グリッドの個数) とする。

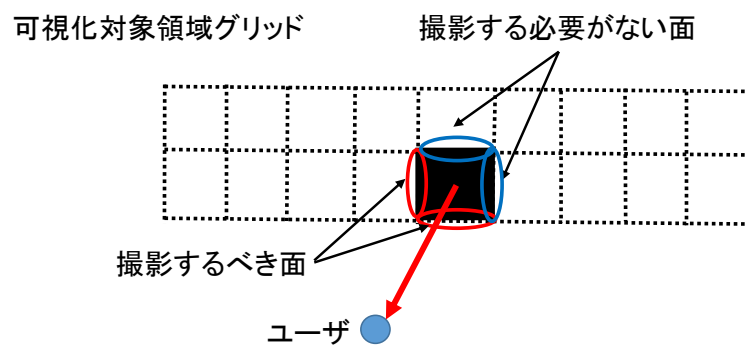


図 3.38: 可視化対象領域グリッドの撮影するべき面と撮影する必要がない面の例 (真上から見た図)

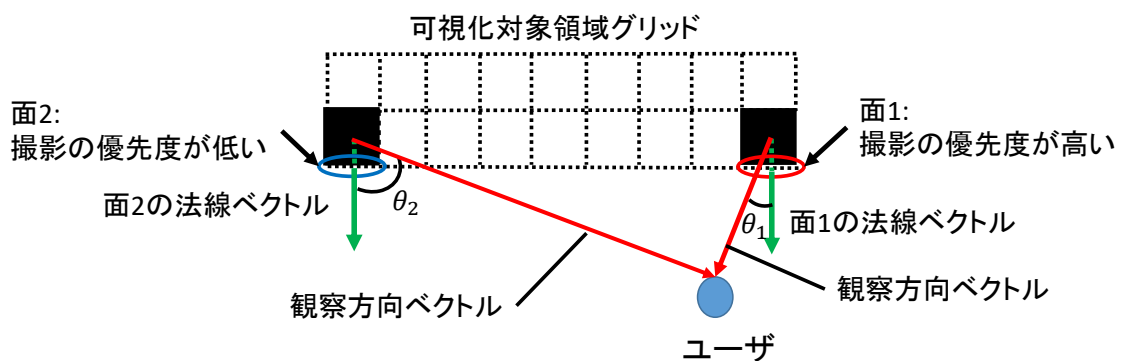


図 3.39: 可視化対象領域グリッドの撮影の優先度が高い面と低い面の例 (真上から見た図)

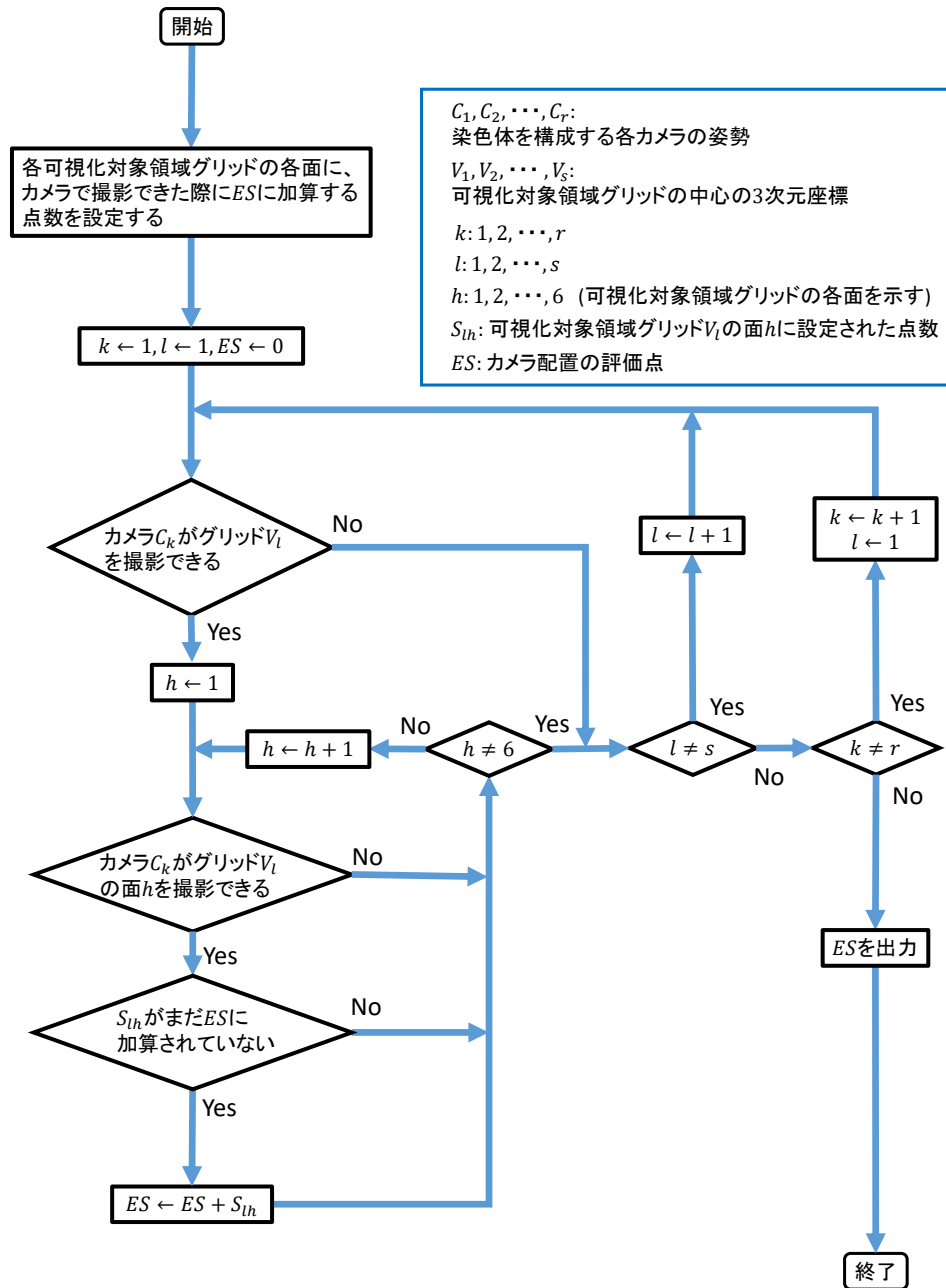


図 3.40: カメラ配置の評価点決定処理のフロー

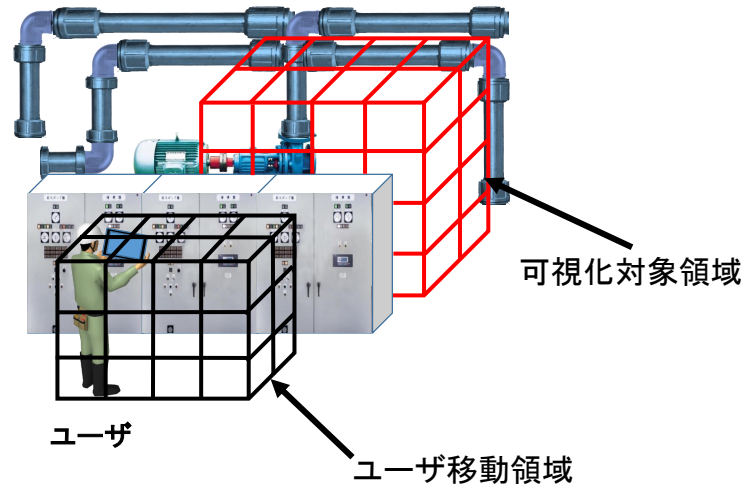


図 3.41: 可視化対象領域およびユーザー移動領域の3次元グリッド分割の例

次に、各可視化対象領域グリッドの各面に、カメラで撮影できた際に ES に加算する点数を設定する。図 3.42 に、各可視化対象領域グリッドの各面の点数設定のフローを示す。まず、図 3.41 に示すように、ユーザー移動領域を可視化対象領域グリッドと同じ大きさのグリッドに分割し、それぞれのグリッドの中心の3次元座標を $\{U\} = U_1, U_2, \dots, U_t$ (t : ユーザー移動領域グリッドの個数) とする。ここでは、可視化対象領域グリッド V_l ($l: 1, 2, \dots, s$) の各面 h ($1, 2, \dots, 6$) に設定する点数を S_{lh} とする。次に、 V_l 、 U_m ($m: 1, 2, \dots, t$) について、グリッド V_l の面 h が、 U_m から観察可能か判定する。ここで、観察可能とは、図 3.43 に示すように、 $\overrightarrow{V_l U_m}$ とグリッド V_l の面 h の法線ベクトル \overrightarrow{N}_h のなす角 θ が 90 度以下であるとする。グリッド V_l の面 h が U_m から観察可能な場合、 S_{lh} に α 点を加える。本手法では、 θ が 0 度に近づくほど、 S_{lh} に高い点数を加算する。 α に設定する点数を表 3.1 に示す。

表 3.1: α に設定する点数

θ [度]	$0 \leq \theta < 15$	$15 \leq \theta < 30$	$30 \leq \theta < 45$	$45 \leq \theta < 60$	$60 \leq \theta$
α	10	6	3	1	0

以上の処理を、全ての l 、 m 、 h の組み合わせに対して行う。最後に、全ての S_{lh} を出力する。

その後、カメラ C_k ($k: 1, 2, \dots, r$) がグリッド V_l ($l: 1, 2, \dots, s$) を撮影できるか判定する。本手法では、以下の3つの条件を満たす場合、カメラ C_k がグリッド V_l を撮影できると判定する。

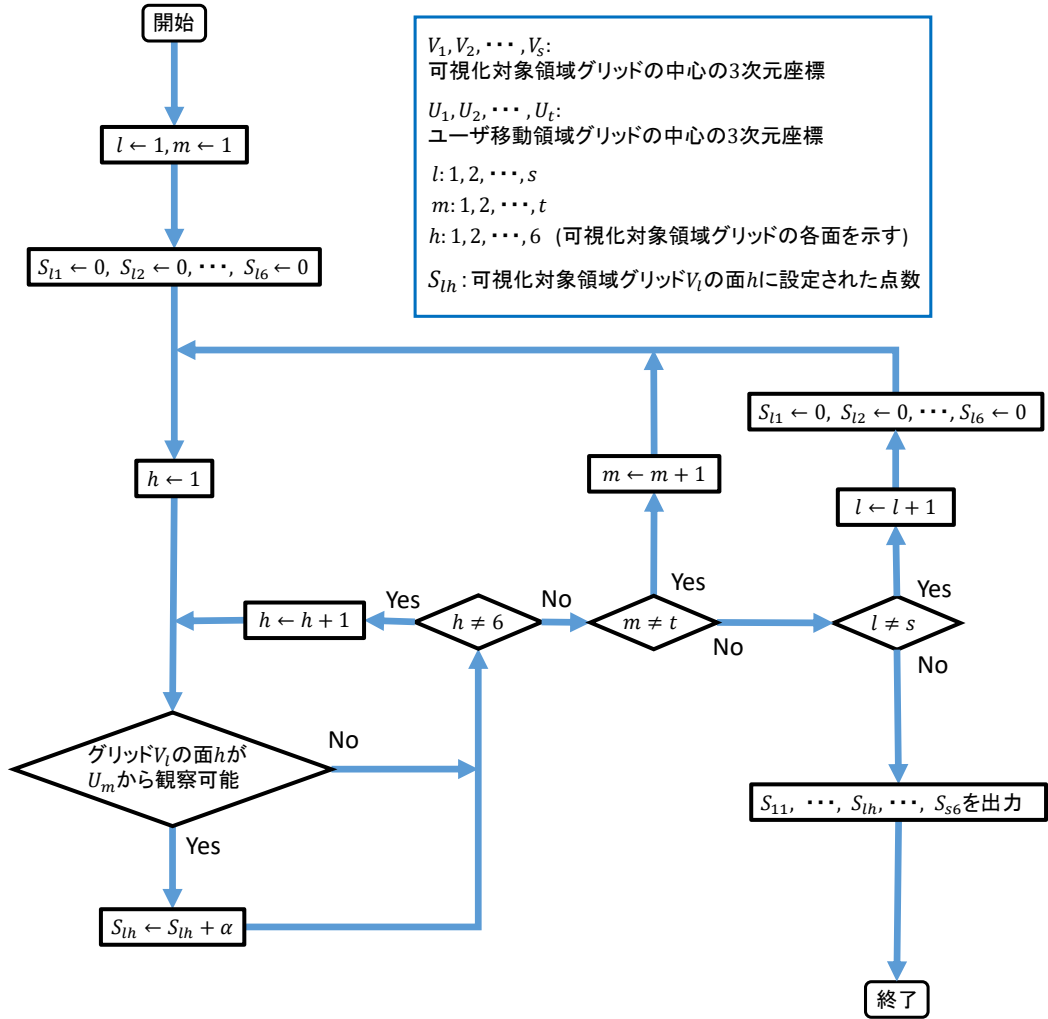


図 3.42: 可視化対象領域を構成する各グリッドの各面の点数設定のフロー

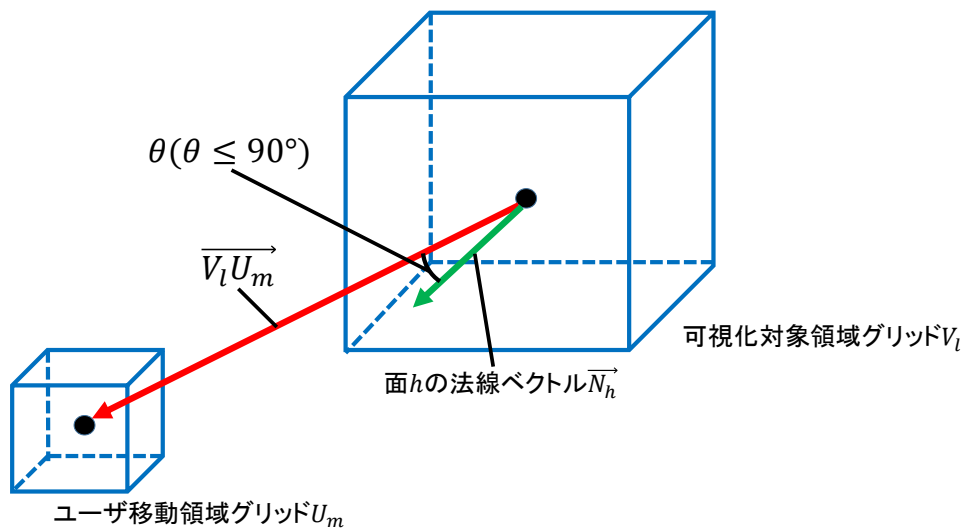


図 3.43: ユーザ移動領域グリッドから可視化対象領域グリッドが観察可能な例

条件 (1) カメラ C_k でグリッド V_l を撮影した際、カメラ画像上でグリッド V_l が観察可能な程度に解像度が保たれるように、カメラ C_k とグリッド V_l の距離が適切な範囲内にある。

条件 (2) グリッド V_l がカメラ C_k の視野角内にある。

条件 (3) 線分 $C_k V_l$ が障害物と接触しない。

条件 (3) の障害物との接触の判定には、処理の高速化のためにブレゼンハムのアルゴリズムを用いる。図 3.44 に、グリッドの撮影可否判定の例を示す。カメラ C_k がグリッド V_l を撮影できると判定された場合、カメラ C_k がグリッド V_l の各面を観察可能かどうか判定する。カメラ C_k がグリッド V_l の面 h を観察可能な場合、 ES に、 S_{lh} を加算する。この処理を、全ての k, l, h の組み合わせに対して行う。最後に、 ES を出力して、処理を終了する。

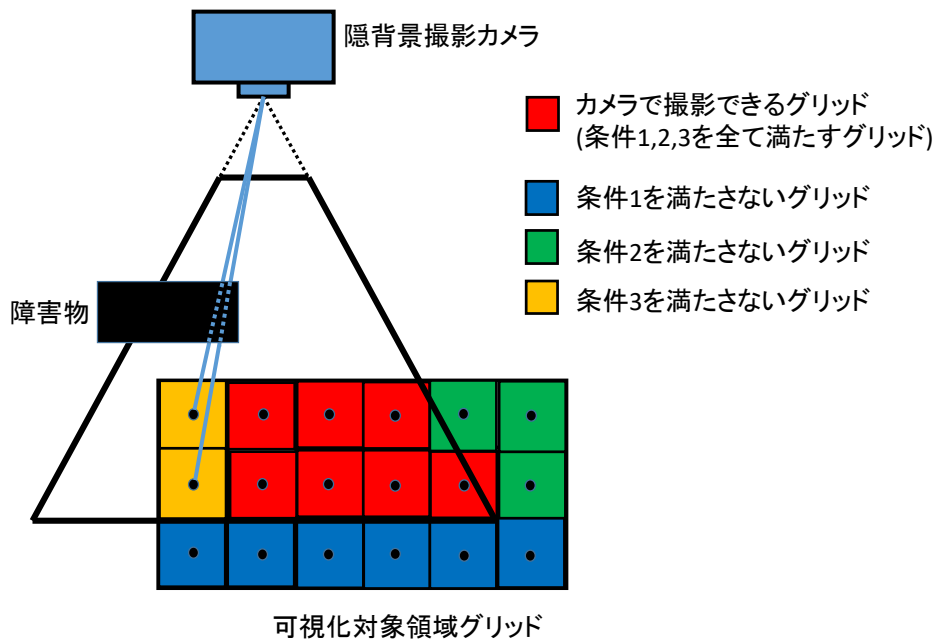


図 3.44: 各可視化対象領域グリッドの撮影可否判定の例 (真上から見た図)

第 4 章 隠背景撮影カメラ配置探索手法の評価

本章では、第 3 章で述べた DR-CAPE の評価について述べる。

4.1 評価の目的

DR-CAPE を実行して得られるカメラの準最適配置が、可視化対象領域をどの程度適切に撮影できるかを評価することを、本評価の目的とする。

4.2 評価の方法

4.2.1 評価の概要

本評価では、第 3 章で述べた DR-CAPE を実装し、実在する環境をもとに生成した 3 次元点群モデルを入力として DR-CAPE を実行した。その際、最適化途中の、各世代で最も評価の高いカメラ配置の得点率が、どのように変化するかについて調べた。得点率 CR (Capturing Rate) は、カメラ配置の評価点 ES (Evaluation Score) とカメラ配置が可視化対象領域グリッドの撮影するべき面を全て撮影できた場合の評価点 ES_{max} を用いて、以下の式 4.1 で定義する。得点率が高いカメラ配置ほど、図 3.38 に示すように、可視化対象領域をユーザ移動領域の方向から適切に撮影できる、良いカメラ配置であることを意味する。

$$CR = \frac{ES}{ES_{max}} \times 100 [\%] \quad (4.1)$$

本評価では、4.2.4 項で述べるパラメータを用いて、DR-CAPE を 10 回実行し、それらの結果の平均を求めることにより評価した。また、本評価では、DR-CAPE で求めたカメラ配置で隠消現実感を実行した場合に、可視化対象領域を適切に可視化できるかについても調べた。

4.2.2 評価に使用した環境

本評価では、京都大学吉田キャンパス総合研究10号館255室をRGB-Dカメラで撮影して得た画像群から生成した3次元点群モデルを入力に用いた。撮影対象とした部屋の見取り図を図4.1に、生成した3次元点群モデルを図4.2に示す。なお、本評価では処理の高速化のため、生成した3次元点群モデルを、点間の距離が40mmになるように間引いて用いた。生成した3次元点群モデルの、間引き前と間引き後の点の総数を、表4.1に示す。また、可視化対象領域およびユーザ移動領域を図4.1、図4.3に示すように設定した。

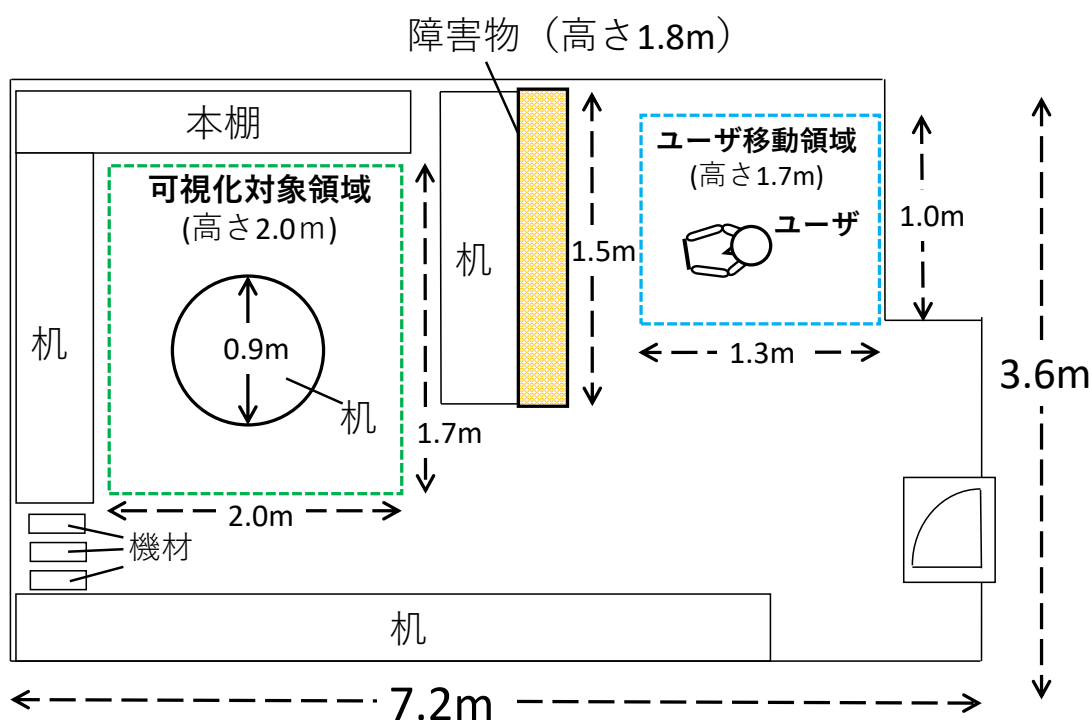


図 4.1: 評価環境の見取り図

表 4.1: 生成した3次元点群モデルの点の総数

点群モデルの状態	点の数
間引き前	4,954,062
間引き後	147,077

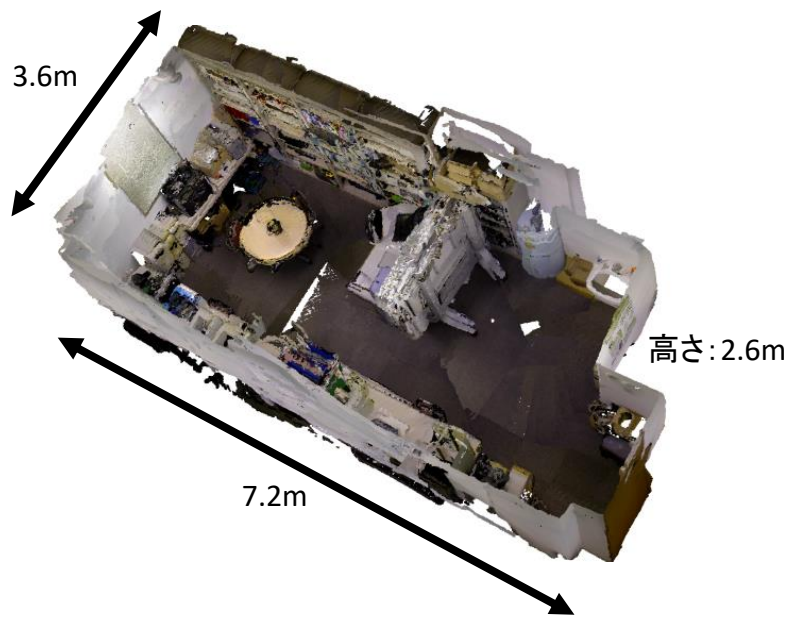


図 4.2: 評価環境の3次元点群モデル

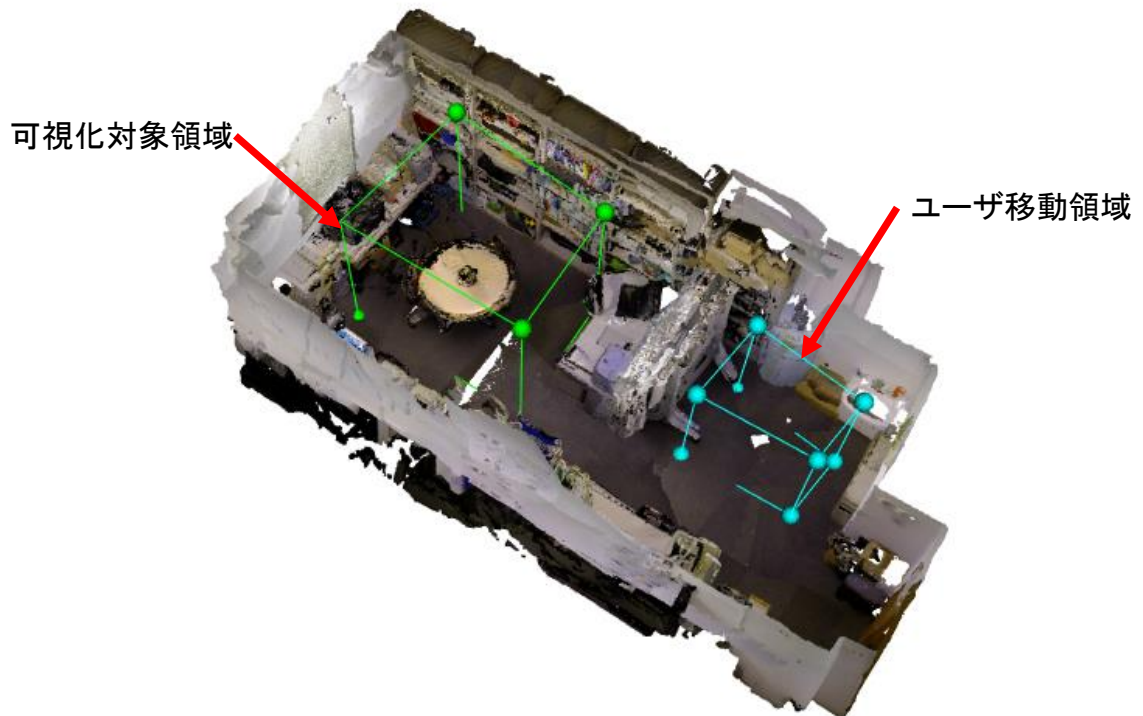


図 4.3: 評価環境内の可視化対象領域およびユーザ移動領域

4.2.3 DR-CAPEの実装

本評価を行うにあたり、DR-CAPEを実装した。DR-CAPEの実行アプリケーションは、Microsoft社のVisual Studio Community 2017を使用して開発し、開発言語はC++を用いた。3次元点群モデルからRegion GrowingおよびRANSACを用いて平面を認識する手法の実装にはPoint Cloud Library(Ver.1.8.1)^[14]を用いた。表4.2にDR-CAPEを実行したPCの仕様を示す。カメラ配置評価には、小型のRGB-Dカメラである、Xtion Pro Liveを撮影カメラとして用いることを想定した。カメラの仕様を表4.3に示す。表4.3中に示すように、RGB-Dカメラで正確な距離を取得できる範囲は0.5m-2.5mとし、この範囲から外れる被写体の距離情報は廃棄する想定とした(なお、本評価ではRGB-Dカメラの撮影範囲を、0.5m-2.5mから、0.5m-1.5mに変更してDR-CAPEを実行した場合に、DR-CAPEで出力されるカメラ配置にどのような変化が現れるかについても調べた)。撮影した部屋の広さ、および使用するカメラの視野角などの撮影範囲から、評価の際に使用を想定するカメラの台数は3台とした。

表 4.2: DR-CAPE を実行した PC の仕様

CPU	Intel Core i7-7700 3.60GHz
RAM	16GB
OS	Windows 10 Pro

表 4.3: カメラの仕様

解像度	640×480pixels
撮影範囲	0.5m-2.5m
FOV	63°×49°

図4.4に、DR-CAPEの動作例を示す。3次元点群モデルを入力すると、まず、カメラ設置可能位置抽出処理を行い、カメラが設置可能な箇所を抽出する。次に、カメラ配置探索処理を実行し、可視化対象領域およびユーザ移動領域をもとに、適切なカメラ配置を求める。最後に、求めたカメラ配置での各カメラの設置位置および方向を、DR-CAPEの実行結果として出力する。

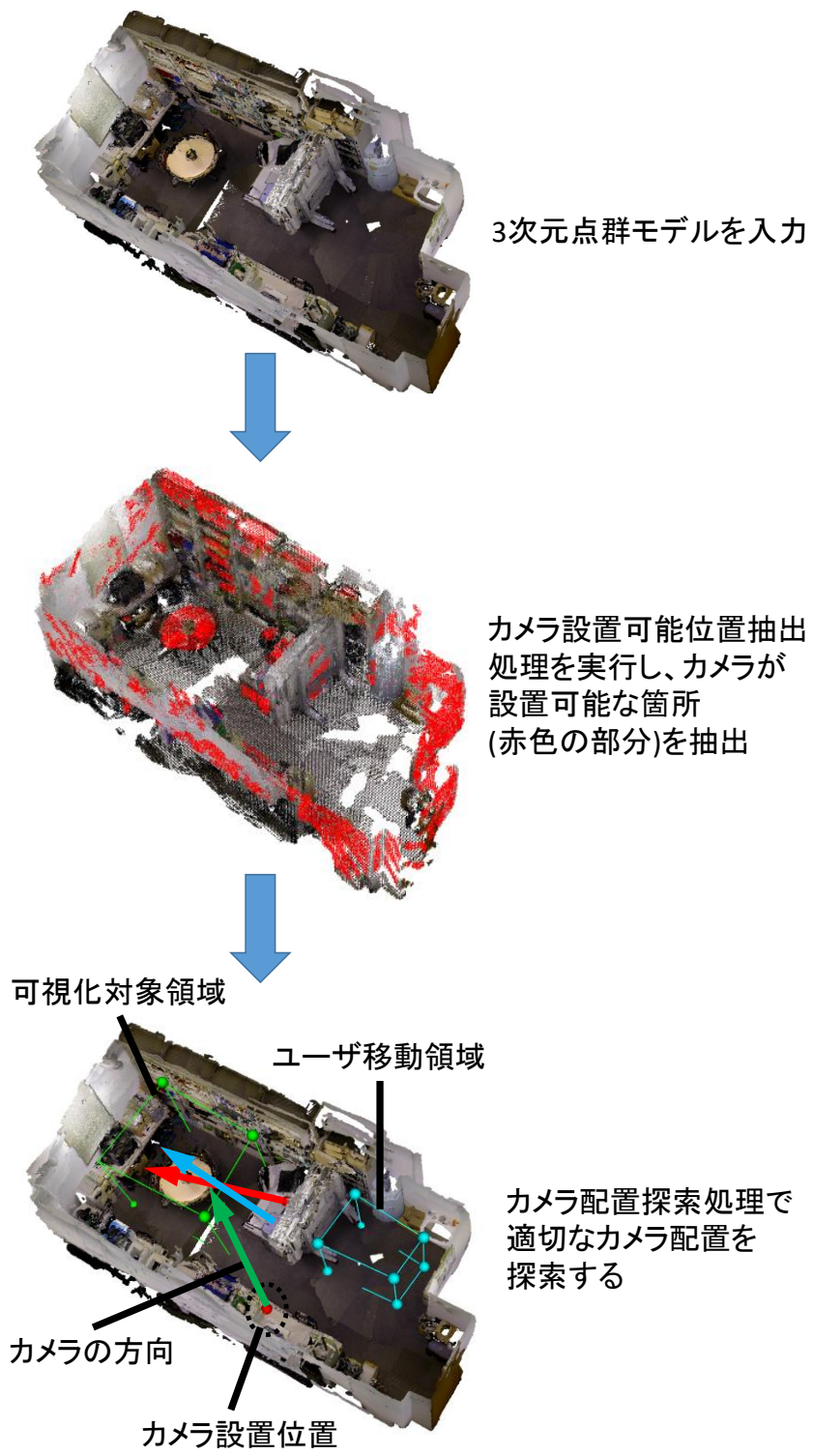


図 4.4: DR-CAPE の動作例

4.2.4 パラメータの設定

表 4.4 に、DR-CAPE 実装の際に設定した各パラメータを示す。以下、表 4.4 のパラメータの内、GA に関する各パラメータを決定する際に用いた方法について述べる。

表 4.4: DR-CAPE 実装で設定した各パラメータ

パラメータ	値
カメラ設置位置候補グリッドの一辺の長さ	100mm
可視化対象領域グリッドの一辺の長さ	300mm
ユーザ移動領域グリッドの一辺の長さ	300mm
GA における総世代数	600
GA における集団数	1000
突然変異発生確率	15%
隣接地転移発生確率	20%
隣接角回転発生確率	15%
エリート染色体割合	15%

図 4.5 に、GA のパラメータ決定のフローを示す。本評価では、表 4.5 に示すように集団数について 10 種類のパラメータの候補を、表 4.6 に示すように、突然変異発生確率、隣接地転移発生確率、隣接角回転発生確率、エリート染色体割合について、それぞれ 5 種類のパラメータの候補を設定した。なお、各パラメータを設定する際は、DR-CAPE を 10 回実行し、全ての回の実行で、各世代での複数のカメラ配置の得点率のうち、最大のものを求め、世代ごとにその平均値を求めてから、得点率の平均値と世代数の関係を調べた。

まず、総世代数を 1000、集団数を 500、その他のパラメータを候補の中央値である設定 3 の値にして、DR-CAPE を実行した。図 4.6 に、世代数と得点率の関係を表すグラフを示す。図 4.6 から、600 世代程度経過したあたりで得点率がほぼ収束しているように見える。そこで、本評価では GA を実行する際の総世代数を 600 世代に決定した。

次に、総世代数を 600、表 4.6 中のパラメータを全て設定 3 の値にして、集団数を設定 1 から設定 10 までそれぞれ変化させて DR-CAPE を実行した。図 4.7 に、集団数別の世代数と得点率の関係を表すグラフを示す。図 4.7 から、最終世代での得点率が最も高くなったのは、集団数 1000 の場合だった。集団数が多くなるほど、最終世代での得点率が高くなると考えられるが、図 4.7 に示したように、集団数が 700 を超えたあた

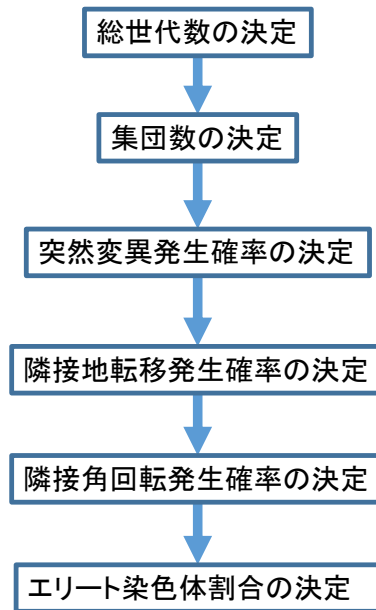


図 4.5: GA のパラメータ決定のフロー

表 4.5: 集団数の候補

	集団数
設定 1	100
設定 2	200
設定 3	300
設定 4	400
設定 5	500
設定 6	600
設定 7	700
設定 8	800
設定 9	900
設定 10	1000

表 4.6: GA の各種パラメータの候補

	設定 1	設定 2	設定 3	設定 4	設定 5
突然変異発生確率 [%]	1	5	10	15	20
隣接地転移発生確率 [%]	1	5	10	15	20
隣接角回転発生確率 [%]	1	5	10	15	20
エリート染色体割合 [%]	1	5	10	15	20

りて、最終世代付近での得点率の差がほとんど生じなくなった。そのため、集団数を 1000 より多く設定しても得点率の増加が見込めず、処理時間が増えるだけと考えられるので、本評価では集団数を 1000 に決定した。

次に、総世代数を 600、集団数を 1000、表 4.6 中の突然変異発生確率以外のパラメータを全て設定 3 の値にして、突然変異発生確率の値を設定 1 から設定 5 までそれぞれ変化させて DR-CAPE を実行した。同様に、突然変異発生確率、隣接地転移発生確率、隣接角回転発生確率、エリート染色体割合についても、総世代数を 600、集団数を 1000、表 4.6 中の変化させるパラメータ以外のパラメータを設定 3 の値にし、変化させるパラメータを設定 1 から設定 5 まで変化させて DR-CAPE を実行した。図 4.8 から図 4.11 に、突然変異発生確率別、隣接地転移発生確率別、隣接角回転発生確率別、エリート染色体割合別の世代数と得点率の関係を表すグラフをそれぞれ示す。図 4.8、図 4.10、図 4.11 に示す結果から、本評価では、突然変異発生確率を 15%、隣接角回転発生確率を 15%、エリート染色体割合を 15% に決定した。図 4.9 に示す結果から、最終世代での得点率が最も高くなったのは、隣接地転移発生確率が 20% の場合だったが、10% を超えたあたりで最終世代付近での得点率の差がほとんど生じなくなった。そのため、隣接地転移発生確率を 20% より高くしても得点率の増加が見込めないため、本評価では隣接地転移発生確率を 20% とした。

なお、分析結果は部屋の実験環境やカメラ台数に依存するため、使用する環境やカメラ台数が変化すると、適切なパラメータの値が異なる可能性がある。

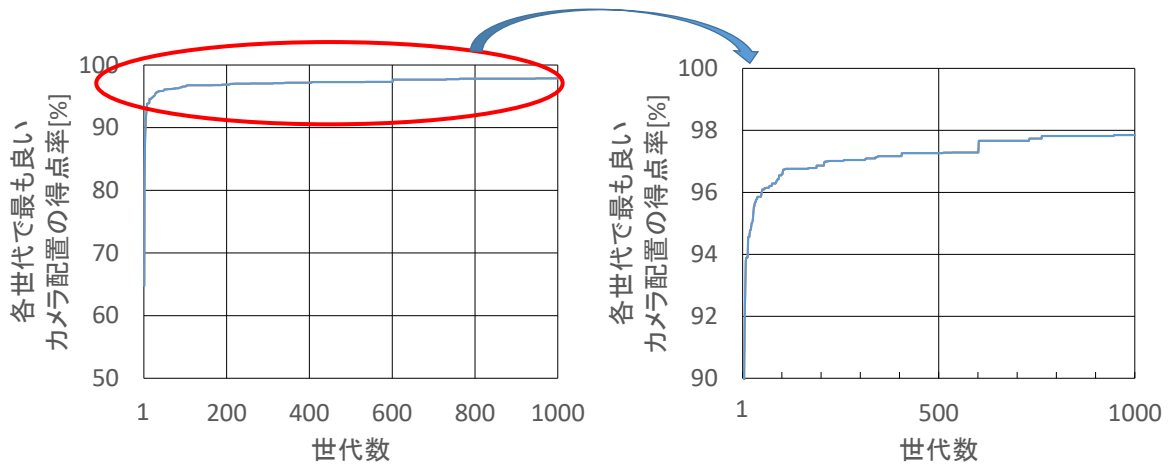


図 4.6: 総世代数が 1000 の場合の世代数と得点率の関係

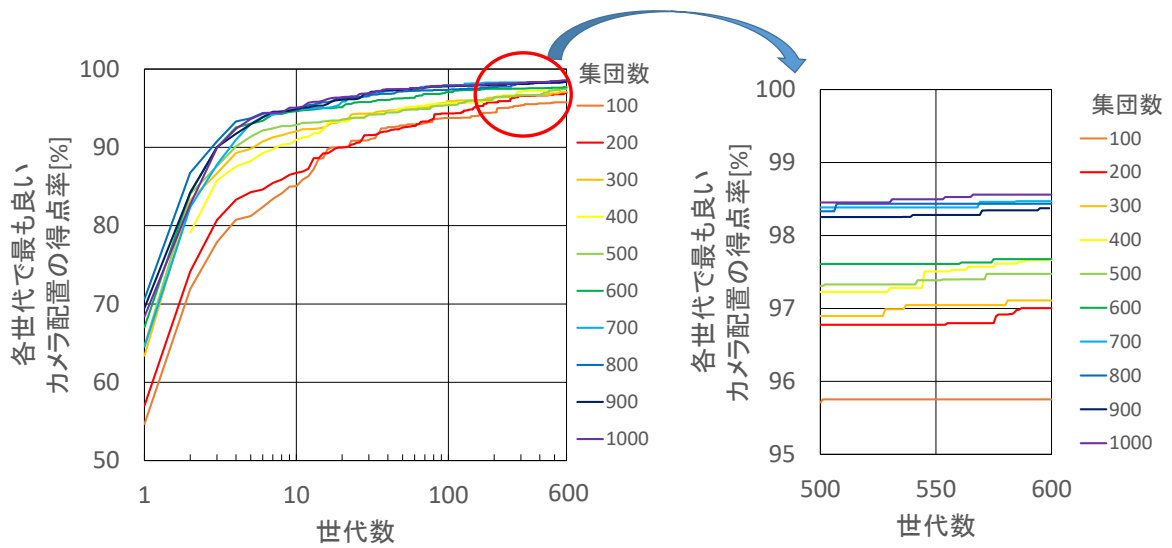


図 4.7: 集団数別の世代数と得点率の関係

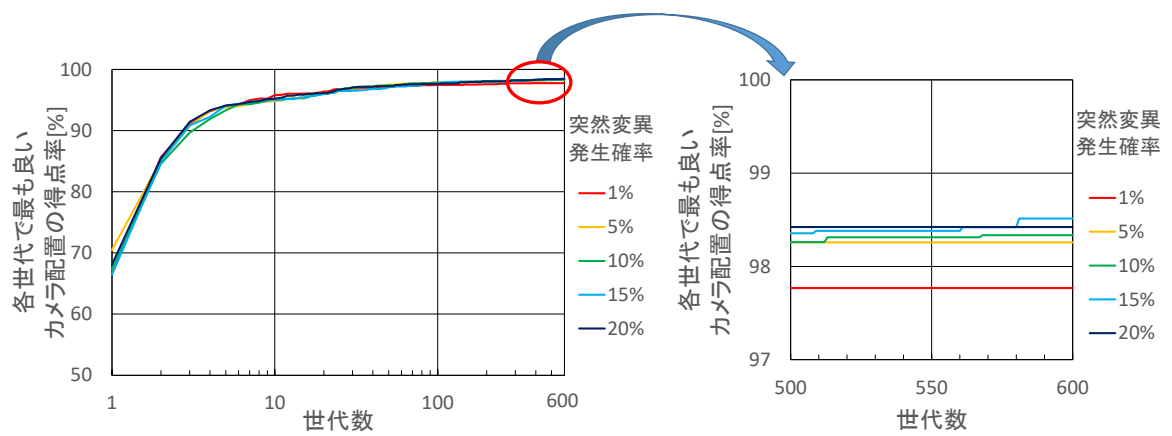


図 4.8: 突然変異発生確率別の世代数と得点率の関係

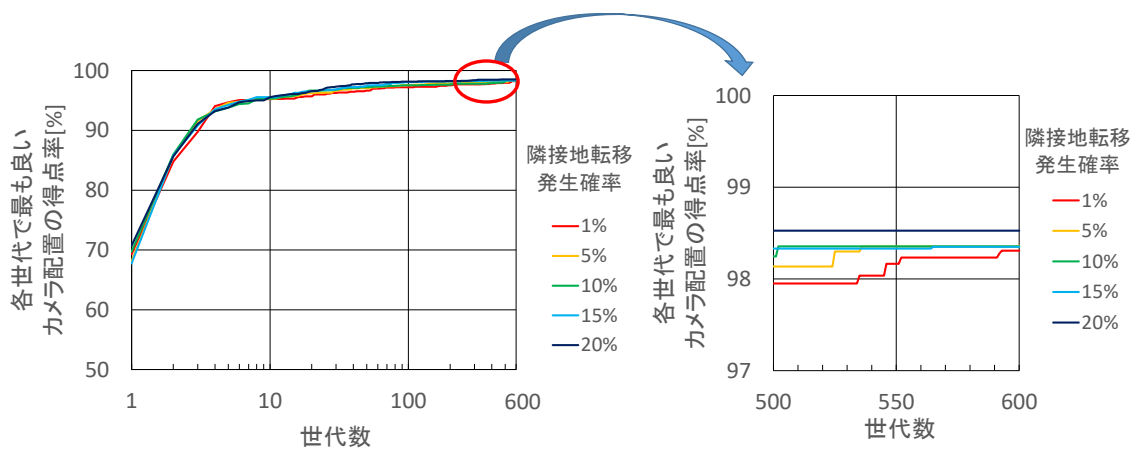


図 4.9: 隣接地転移発生確率別の世代数と得点率の関係

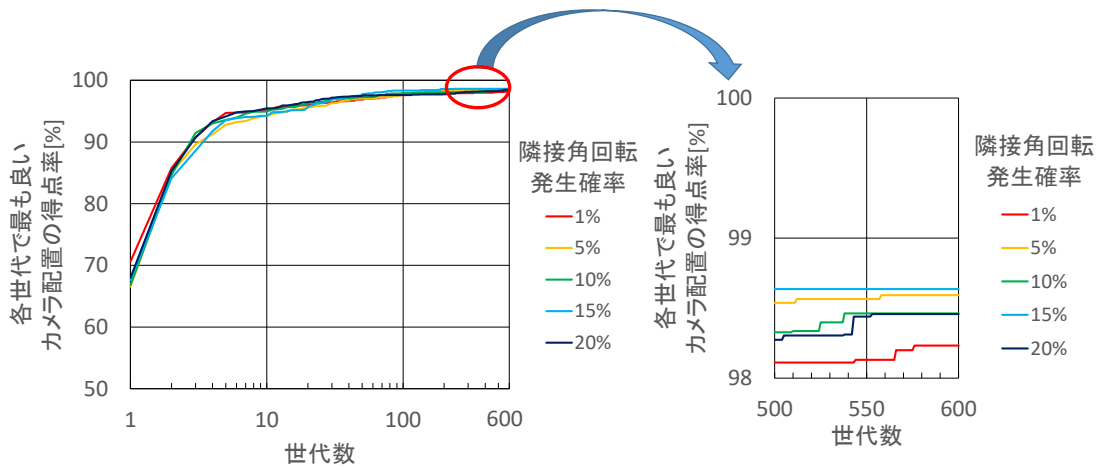


図 4.10: 隣接角回転発生確率別の世代数と得点率の関係

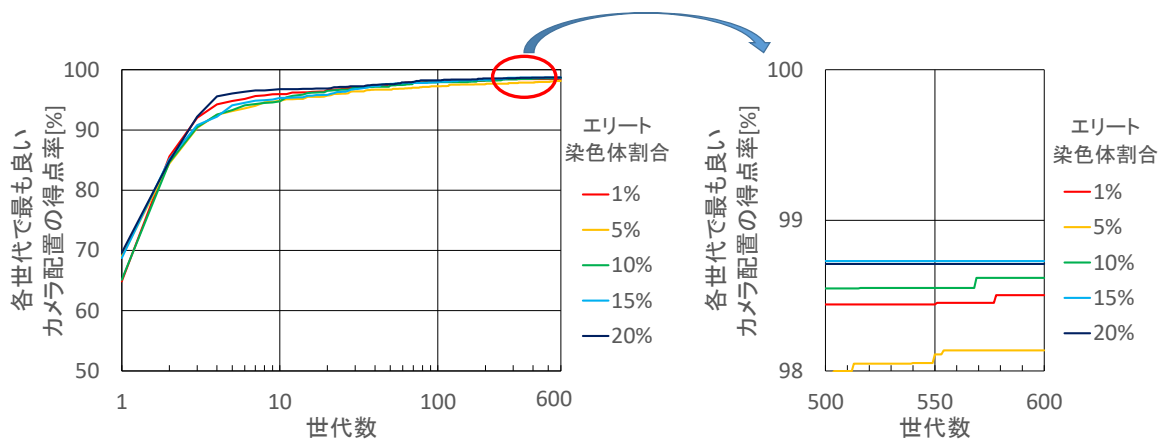


図 4.11: エリート染色体割合別の世代数と得点率の関係

4.3 評価の結果と考察

以下では、本評価の結果と考察について述べる。なお、特に断りのない限り、RGB-Dカメラの撮影範囲は0.5m-2.5mであるとする。

図4.12に、表4.4に示したパラメータを用いてDR-CAPEを10回実行した際の、得点率の平均値と世代数の関係を表すグラフを示す。また、図4.13に、世代数の増加に伴うカメラ配置の変化の例を示す。図4.12に示すように、得点率は第1世代から第10世代で著しく増加し、第10世代から増加が緩やかになり収束している。これは、第1世代付近では、可視化対象領域を撮影できる方向を向いていないカメラが含まれるカメラ配置ばかりであったが、GAの処理が進むにつれて、3台のカメラ全てが可視化対象領域を撮影できる方向を向いているカメラ配置が含まれるようになったためと考えられる。このことは、図4.13に示したように、第1世代では3台のカメラの内、可視化対象領域の方向を向いているカメラは2台だけであるが、第10世代から第600世代では、3台全てのカメラが可視化対象領域の方向を向いていることから説明できる。

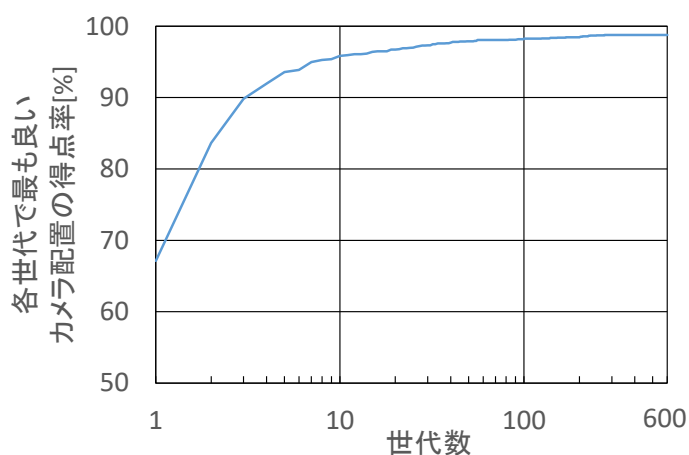


図 4.12: 世代数と得点率の関係

図4.14に、隠消現実感を使用せずにユーザ移動領域から可視化対象領域を撮影した場合の映像の例を、図4.15に、DR-CAPEで準最適配置を求める途中の世代でのカメラ配置で隠背景撮影カメラを配置し、隠消現実感を使用した場合の映像の例を示す。第1世代では、可視化対象領域に存在する机を完全に可視化できていないが、世代数が増加するにつれ、可視化された領域が徐々に広がり、最終的に机およびその周辺を観察できるようになったことが確認できた。このように、DR-CAPEが出力したカメラ配置で隠消現実感を実行すれば、適切に可視化対象領域を可視化できることが分かった。

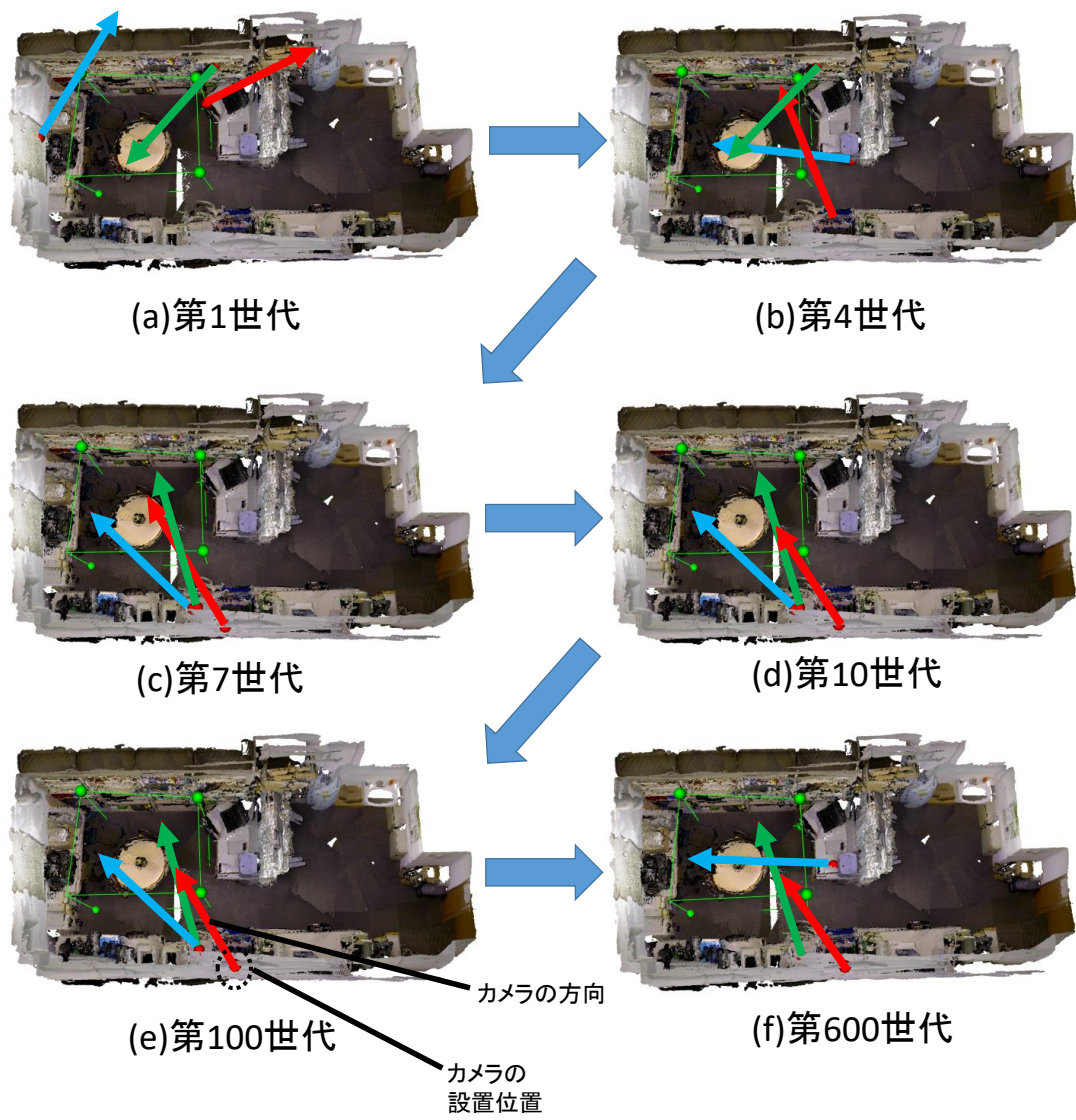


図 4.13: 世代数の増加に伴うカメラ配置の変化の例



図 4.14: 隠消現実感を使用せずにユーザ移動領域から可視化対象領域を撮影した映像の例

表 4.7 に、カメラ設置可能位置抽出処理、カメラ配置探索処理、DR-CAPE 全体の処理に要した時間の平均値を示す。また、表 4.8 に、カメラ設置可能位置抽出処理で検出した平面数および抽出したカメラ設置可能位置数を示す。表 4.8 に示すカメラ設置可能位置数から、カメラ配置の候補の総数は約 60 億通り存在する。1 つのカメラ配置の評価点の計算に要する時間は 1.90ms であったため、全てのカメラ配置を評価して最も得点率の高いカメラ配置を探索する (全数探索する) には、約 130 日必要となる。このように、DR-CAPE は全数探索して最適解を求めるよりも遥かに短い時間で、隠背景を適切に可視化できるカメラ配置を求められることが分かった。

表 4.7: DR-CAPE の各処理に要した時間の平均値

処理内容	処理時間 [s]
カメラ設置可能位置抽出処理	10.7
カメラ配置探索処理	106.0
DR-CAPE 全体の処理	116.7

また、カメラの撮影範囲を 0.5m-2.5m から、0.5m-1.5m に変更して DR-CAPE を実行すると、図 4.16 に示すように、可視化対象領域内の机に 1 台のカメラを配置するカメラ配置が出力された。人がカメラ配置を考える場合、カメラの撮影範囲を意識しづらいことから、この配置は人が考えた場合では思いつきにくい配置であると考えられる。このように、DR-CAPE では、人が考えた場合では思いつきにくいカメラ配置を求められる可能性があることが分かった。

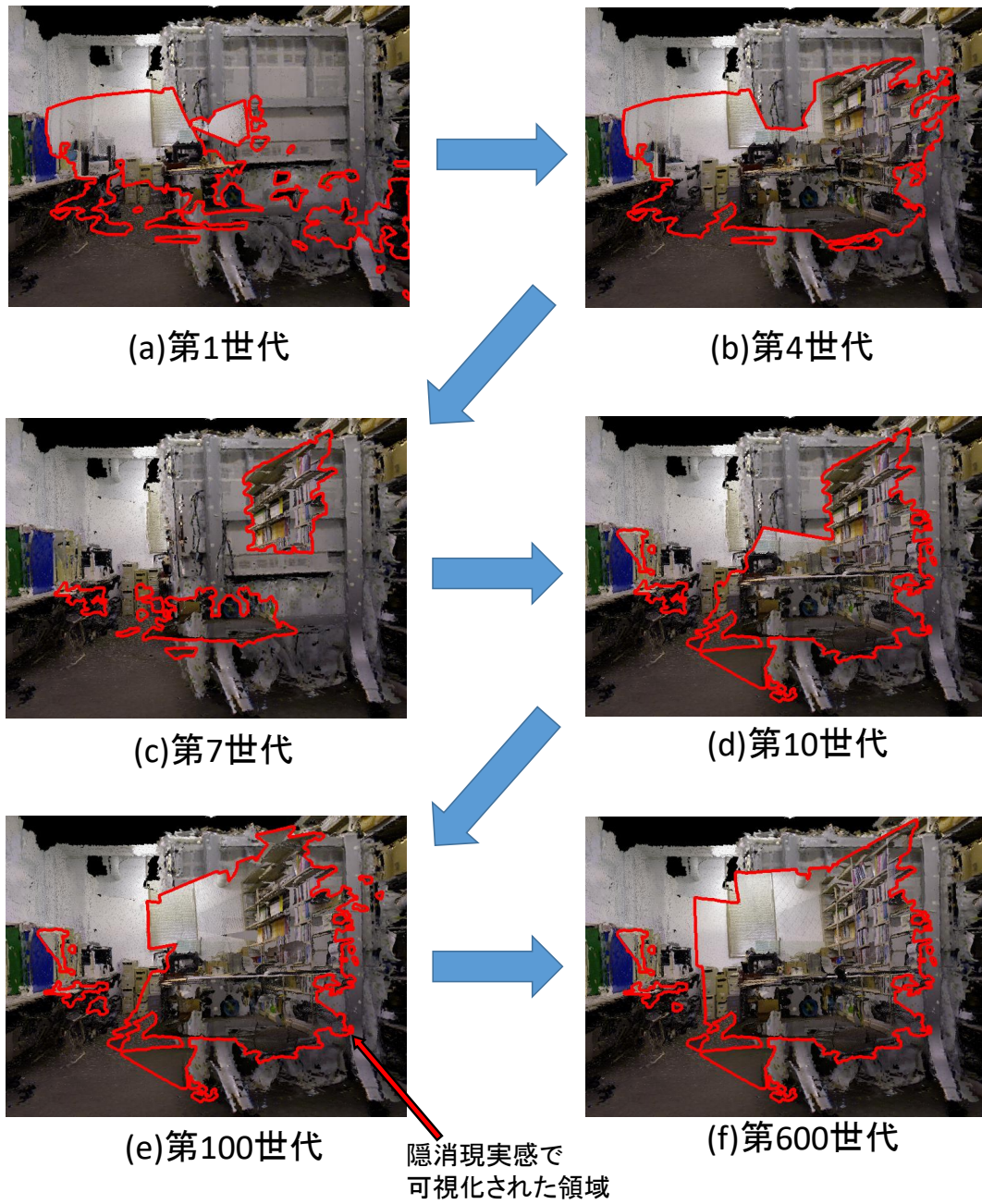
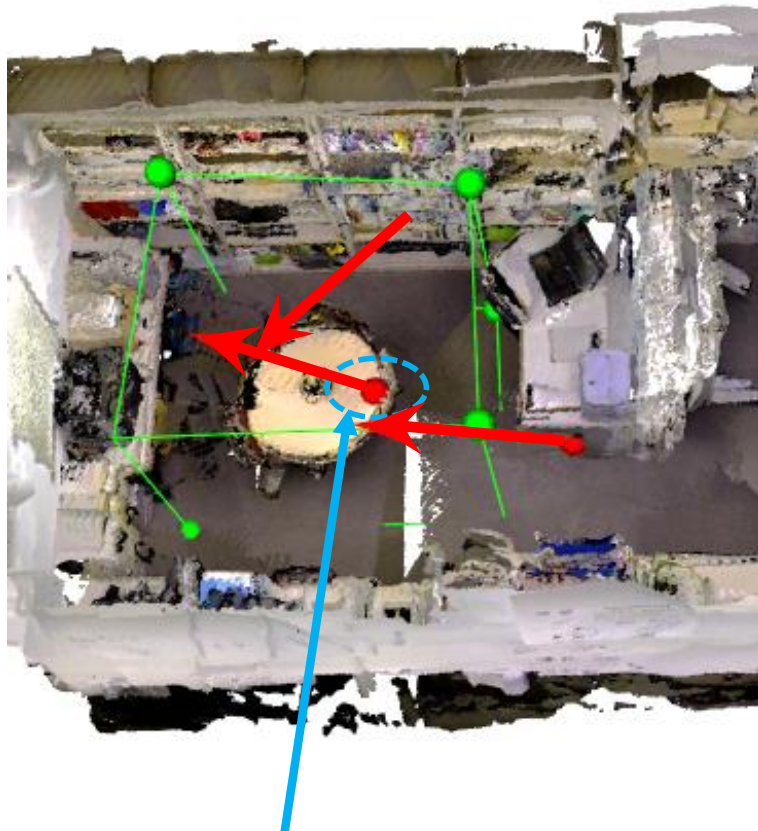


図 4.15: 世代数の増加に伴う隠消現実感の実行結果の変化の例

表 4.8: カメラ設置可能位置抽出処理で検出した平面数および抽出したカメラ設置可能位置数

検出・抽出した物	数
平面	96
カメラ設置可能位置	900



可視化対象領域内の机に設置されたカメラ

図 4.16: 一部のカメラが可視化対象領域内の机に設置されたカメラ配置の例

第 5 章 結論

本研究では、原子力発電所内で隠消現実感を利用する場合、隠背景撮影カメラの設置位置の判断が困難であるという問題の解決を目指し、隠背景撮影カメラの配置探索手法 (DR-CAPE) を開発した。また、DR-CAPE を実装し、実在する環境に対して使用することで、DR-CAPE が出力するカメラ配置が、可視化対象領域をどの程度適切に撮影できるかを評価した。

第 2 章では、本研究の背景として、原子力発電所内で隠消現実感を実行する場合の問題について述べた後に、この問題を解決できると考えられる、カメラ配置の準最適解探索手法に関する既往研究について述べた。その後、本研究の目的が、原子力発電所内での使用を想定した、DR-CAPE を開発することであることを述べた。

第 3 章では、DR-CAPE の詳細について述べた。まず、DR-CAPE の目的について述べ、次に DR-CAPE を開発する上での前提条件について述べた。その後、DR-CAPE の主要な処理である、カメラ設置可能位置抽出処理と、GA を用いたカメラ配置探索処理の詳細について述べ、最後にカメラ配置探索処理でのカメラ配置の評価方法について述べた。

第 4 章では、DR-CAPE を実装して実際の環境に対して使用し、得られた結果から行った性能の評価について述べた。

本研究で行った評価の結果から、GA における世代数の増加に伴い、カメラが撮影できる可視化対象領域と、隠消現実感で可視化できる領域が徐々に広くなり、最終的に DR-CAPE が出力したカメラ配置で隠消現実感を実行した場合、適切に隠背景を可視化できることが分かった。また、全数探索で最適解を求めるよりも遥かに短時間で適切なカメラ配置を求められることや、人が思いつきにくいようなカメラ配置を求められる場合があることも分かった。

今後の課題としては、隠背景撮影カメラとして実際のカメラを用いた場合でも、DR-CAPE が出力したカメラ配置で隠消現実感を問題なく実行できることを確認することが挙げられる。また、ユーザが DR-CAPE を容易に使用できるようにするためのインタフェースを開発することも今後の課題として挙げられる。具体的には、図 5.1 に示すような、可視化対象領域およびユーザ移動領域を QR コードなどのマーカで指定できるインタフェースや、図 5.2 に示すような、DR-CAPE が出力するカメラ配置を拡張現

実感を用いて直感的に提示するインターフェースなどを開発、実装することでユーザが容易に DR-CAPE を使用できるようになると考えられる。

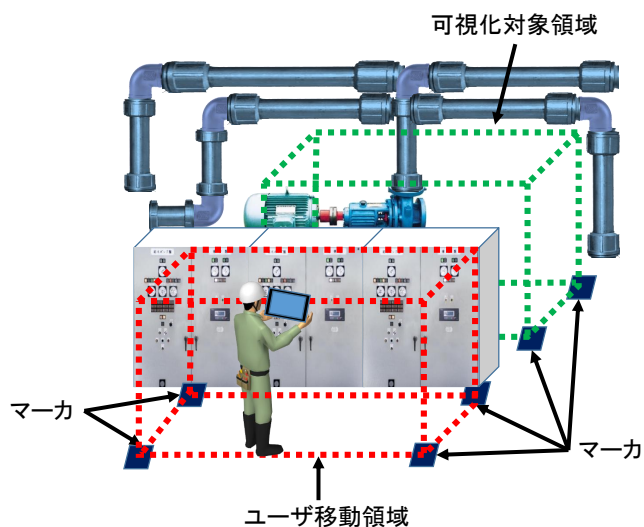


図 5.1: マーカを用いた可視化対象領域およびユーザ移動領域の指定の例

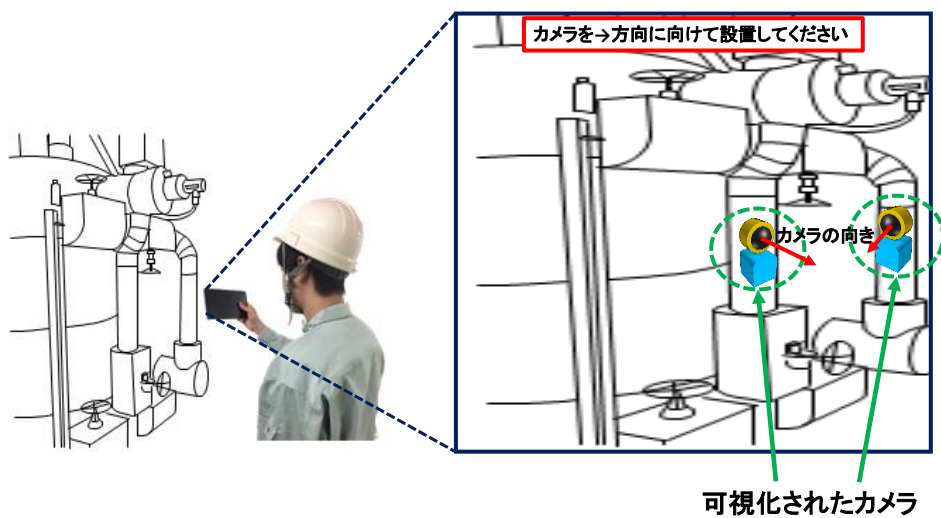


図 5.2: 拡張現実感を用いたカメラ配置表示の例

謝 辞

本研究を進めるにあたって様々なアドバイスをしていただき、また研究生活で躓いた際に親身に相談に乗ってくださった下田宏教授に深く感謝申し上げます。

システム開発から、プログラミング指導、ミーティングでの研究相談、論文の執筆指導まで多くのご指導、ご鞭撻をいただき、様々な場面で社会人としての心得をご教授してくださった石井裕剛准教授に、心より感謝申し上げます。

事務手続きや研究生活全般で支援をしていただき、研究および論文執筆を応援してくださった普照郁美秘書に深く感謝いたします。

同じチームのメンバーとして、ミーティングに参加していただき、研究および論文執筆のサポートをしてくださったエネルギー科学研究科博士課程の原園友規さんに、心から感謝申し上げます。

論文の添削や執筆のアドバイスをしていただき、論文執筆をサポートしてくださったエネルギー科学研究科修士1回生の大本悠輔君、坂本龍平君に深く感謝いたします。

同じ研究室のメンバーとして、様々な場面で支援をしていただき、時には一緒に遊び、楽しく有意義な研究生活を過ごせるようにしてくださったエネルギー科学研究科博士課程の上田樹美さん、エネルギー科学研究科修士2回生の木村覚君、竹川和佳子さん、東山豊大君、田村太一君、久留島隆史さん、Nur Hasfiana Hamuddinさん、エネルギー科学研究科修士1回生の坂本佳樹君、宮崎大輔君、高島由妃さん、Xue Dingming君、工学部電気電子工学科4回生の魚谷拓未君、山脇瑞記さん、湯村航平君に、心より御礼申し上げます。

最後に、家族、友人、研究生活を支えていただいたすべての方々に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁: 原子力発電所の現状, https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf, Accessed February 14, (2020).
- [2] 森尚平, 一刈良介, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: 隠消現実感の技術的枠組と諸問題～現実世界に実在する物体を視覚的に隠蔽・消去・透視する技術について～, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **16**(2), pp. 239-250, (2011).
- [3] Shohei Mori, Sei Ikeda and Hideo Saito: A survey of diminished reality: Techniques for visually concealing, eliminating, and seeing through real objects, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, (2017).
- [4] Guilin Liu, Fitsum A. Reda, Kevin J. Shih, Ting-Chun Wang, Andrew Tao and Bryan Catanzaro: Image Inpainting for Irregular Holes Using Partial Convolutions, The European Conference on Computer Vision (ECCV), pp. 85-100, (2018).
- [5] Norihiko Kawai, Tomokazu Sato and Naokazu Yokoya: Diminished Reality Based on Image Inpainting Considering Background Geometry, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **22**(3), pp. 1236-1247, (2015).
- [6] Xincong Yang, Heng Li, Ting Huang, Ximei Zhai and Fenglai Wang, Chen Wang: Computer-Aided Optimization of Surveillance Cameras Placement on Construction Sites, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, **33**(12), pp. 1110-1126, (2018).
- [7] 萩原将文: ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書, pp. 93-95, (1994).
- [8] Jinwoo Kim, Youngjib Ham, Yohun Chung and Seokho Chi: Systematic Camera Placement Framework for Operation-Level Visual Monitoring on Construction Jobsites, Journal of Construction Engineering and Management, **145**(4), doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001636, (2019).

- [9] Azeddine Aissaoui, Abdelkrim Ouafi, Philippe Pudlo, Christophe Gillet, Zineddine Baarir and Abdelmalik Taleb-Ahmed: Designing a camera placement assistance system for human motion capture based on a guided genetic algorithm, *Virtual Reality*, **22**(1), pp. 13-23, (2018).
- [10] Chihiro Matsunuma, Yuji Abe and Hiroshi Masuda: Reconstruction of Cylinder and Rectangle Faces by Detecting Edges in Large-Scale Point-Cloud, *Proceedings of JSPE Semestrial Meeting*, **2010A**, pp. 63-64, (2010).
- [11] Heung-Yeung Shum, Qifa Ke and Zhengyou Zhang: Efficient Bundle Adjustment with Virtual Key Frames: a Hierarchical Approach to Multi-Frame Structure from Motion, *Proceedings. 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cat. No PR00149)*, doi: 10.1109/CVPR.1999.784733, (1999).
- [12] R. Adams, L. Bischof: Seeded region growing, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **16**(6), pp. 641-647, (1994).
- [13] Martin A. Fischler, Robert C. Bolles: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, **24**, pp. 381-395, (1981).
- [14] Point Cloud Library, <http://pointclouds.org/>, Accessed February 14, (2020).
- [15] J. E. Bresenham: Algorithm for computer control of a digital plotter, *BM Systems Journal*, **4**(1), pp. 25-30, (1965).