平成20年度
中部大学大学院工学研究科情報工学専攻

博士学位論文

多眼非同期カメラによる3次元位置推定と道路構造認識への応用に関する研究

清水 彰一

論　文　要　旨

本論文は，多眼非同期カメラによる 3 次元位置推定法と，その 3 次元位置を道路構造認識へ応用したものである．従来，対象物体の 3 次元位置を計測するには，多眼カメラによるステレオ視が用いられている．ステレオ視を用いて移動体の 3 次元位置を計測するには，同期機構を持つ複数のカメラを用いて，シャッタータイミングを同時にした画像群を撮影する必要がある．近年普及しつつある安価な USB カメラは同期機構を持たないため，従来のステレオ視では 3 次元位置を推定することが困難であるという問題がある．

そこで本論文では，多眼非同期カメラによる 3 次元位置推定法を提案する．非同期カメラにおけるステレオ視の問題点は，同一時刻の対応点が存在しないことである．本手法では，対象物の運動軌跡を補間することでこの問題を解決する．固定カメラでは，対象物の運動軌跡を画像平面上で補間することができるため，同一カメラにおける過去 3 フレームの情報を用いてスプライン曲線で補間する．このスプライン曲線と他方のカメラの観測点から求められるエピポーラ線の交わる点を擬似対応点として算出し，ステレオ視で 3 次元位置を求める．過去 3 フレームの 3 次元位置から，最新フレームの 3 次元位置を最新フレームの画像から得られる光線の拘束を利用することで，高精度に 3 次元位置を求めることが可能となる．以上の処理を各カメラのシャッタータイミング毎に行うことにより，従来のステレオ視より多くの最新フレームの 3 次元位置を出力することが可能となる．

一方，非同期パン・チルトカメラでは，画像平面上において運動軌跡を補間することができない．そこで，カメラの内部・外部パラメータを用いて，3 次元空間中に対象物の運動軌跡を補間する．本手法では，同一カメラにおける過去 3 フレームの光線から 3 次元空間中にスプライン曲面を生成し，この曲面と他方のカメラから決定される光線の交点を 3 次元位置とする．これにより，特定物体の 3 次元位置推定を非同期のパン・チルトカメラにおいて実現することができた．

3 次元シーンの理解や認識には，特定の対象物だけでなく，画像全体のエッジの 3 次元情報を求める必要がある．従来提案されている Space Sweeping 法は，複数の z 平面を仮定し，その z 平面を基準とした奥行きを推定する．しかし，z 平面の移動間隔やグリッドの分割数などのパラメータに推定精度が影響するという問題がある．そこで，z 平面を移動した際のエッジの遷移を考慮することにより，精度がパラメータに影響されない手法を提案する．評価実験により，提案手法は従来法より高精度に奥行き推定が可能であることを確認した．

さらに本論文では，3 次元画像計測技術の応用例として車載カメラを用いた道路構造の認識法を提案する．車載カメラ画像より検出した視線誘導標の 3 次元位置情報にクロソイド曲線を当てはめることで，遠距離の道路構造認識を実現した．また近距離においては，白線の 3 次元情報を用いた道路形状の復元手法を提案し，評価実験により有効性を確認した．提案手法により認識した道路構造情報は，安全かつ快適な運転サポートシステムへの貢献が期待できる．

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1　本研究の背景 2
1.2　本研究の目的 3
1.3　本論文の構成 4

第 2 章　3 次元画像計測技術 **7**
2.1　画像入力の現状 8
2.2　パッシブ手法による 3 次元画像計測 8
2.2.1　多眼同期カメラによる距離計測法 8
2.2.2　多眼非同期カメラによる距離計測法 16
2.2.3　単眼カメラによる距離計測法 17
2.3　アクティブ手法による 3 次元画像計測 18
2.3.1　アクティブ手法の概要 18
2.3.2　三角測量に基づく手法 18
2.3.3　TOF 距離画像センサ 20
2.4　各距離計測法の応用例 21
2.5　まとめ 22

第 3 章　多眼非同期固定カメラによる高速 3 次元位置推定 **25**
3.1　非同期カメラにおけるステレオ視の問題点 26
3.2　最新フレームの 3 次元位置推定 26
3.3　固定非同期カメラにおける過去フレームの 3 次元位置推定 29
3.3.1　2 次のスプライン曲線による擬似対応点の作成と 3 次元位置推定 29
3.3.2　推定位置の信頼性 32
3.4　多眼カメラへの拡張 33
3.5　評価実験 34
3.5.1　シミュレーション実験 34
3.5.2　実際のカメラを用いた実験 37
3.5.3　多眼非同期カメラによるボールの 3 次元位置推定実験 40
3.5.4　処理時間 41

3.6 まとめ 43

第 4 章 多眼非同期パン · チルトカメラによる高速 3 次元位置推定 45

4.1 最新フレームの 3 次元位置推定 46
4.2 パン · チルト非同期カメラにおける過去フレームの 3 次元位置推定 46
4.2.1 2 次のスプライン曲面による 3 次元位置推定 46
4.2.2 直線と曲面の交点の探索 48
4.2.3 推定位置の信頼性 50
4.3 多眼カメラへの拡張 50
4.4 評価実験 52
4.4.1 シミュレーション実験 52
4.4.2 実験結果 52
4.4.3 実際のカメラを用いた実験 53
4.4.4 実験結果 54
4.4.5 処理時間 55
4.5 まとめ 56

第 5 章 エッジの遷移を利用した Space Sweeping 法による 3 次元計測 59

5.1 従来法の問題点 60
5.2 Space Sweeping 法におけるエッジの遷移 61
5.2.1 平面 z におけるエッジ間の距離 61
5.2.2 エッジ間距離の定式化 62
5.3 カメラの台数と配置 63
5.3.1 カメラの台数 63
5.3.2 カメラの配置 63
5.4 エッジの遷移を利用した奥行き推定 65
5.5 対応点候補の削減 68
5.6 非同期カメラへの展開 69
5.7 シミュレーション実験 70
5.7.1 対応点候補の削除と組み合わせ回数 70
5.7.2 奥行き推定実験 70
5.7.3 従来法との定量的評価 71
5.8 実カメラを用いた実験 75
5.9 まとめ 75

第 6 章 視線誘導標の 3 次元位置を用いた道路構造認識 77

6.1 背景 78
6.2 道路の設計法 78

6.2.1 中心線 78
6.2.2 カーブ 78
6.2.3 クロソイド曲線 79
6.3 視線誘導標 81
6.3.1 視線誘導標の構造 81
6.3.2 設置計画 85
6.4 視線誘導標の検出 87
6.4.1 円検出フィルタ 87
6.4.2 反射光の中心検出 87
6.4.3 3 次元位置推定 88
6.5 道路構造の推定 89
6.5.1 座標系の定義 89
6.5.2 視線誘導標モデルの定義 90
6.5.3 手法の流れ 91
6.5.4 Support Vector Machine(SVM) の学習 92
6.6 視線誘導標の検出実験 93
6.7 道路構造の認識実験 95
6.7.1 視線誘導標への当てはめ精度 95
6.7.2 仮想道路画像の作成 97
6.7.3 道路構造認識 98
6.7.4 車載カメラを用いた実験 101
6.8 まとめ 102

第 7 章 白線の 3 次元位置を用いた道路構造復元 105
7.1 背景 106
7.2 道路構造の復元 106
7.2.1 道路モデルとパラメータの定義 106
7.2.2 問題 108
7.3 道路パラメータの推定 108
7.4 道路構造復元の実験 112
7.5 まとめ 112

第 8 章 結論 117

謝 辞 119

参考文献 121

研究業績一覧 127

図 目 次

1.1 本論文の構成 5

2.1 ステレオ視 9
2.2 平行ステレオ 11
2.3 エピポーラ線 12
2.4 ステレオマッチング 13
2.5 マルチベースラインステレオ 14
2.6 各ペアごとの組み合わせ 15
2.7 光線との交点の投票 16
2.8 アクティブ手法による距離計測の基本原理 19
2.9 Swiss Ranger SR-3000 21

3.1 2 台のカメラにおけるシャッタータイミングの組み合わせ 26
3.2 非同期カメラにおける時間ずれによる誤差 27
3.3 最新フレームの 3 次元位置推定 28
3.4 各シャッタータイミングによる最新フレームの 3 次元位置推定 29
3.5 スプライン曲線による 3 次元位置推定 30
3.6 線形とエピポーラ線の交点を擬似対応点とした際の 3 次元位置 31
3.7 スプライン曲線とエピポーラ線の交点算出 31
3.8 スプライン曲線とエピポーラ線の交点の誤差 32
3.9 3 台の多眼カメラへ拡張 33
3.10 仮想カメラの配置 (3 台) 35
3.11 誤差と交点角 θ の関係 37
3.12 カメラの配置とターンテーブル 38
3.13 3 次元位置推定結果 39
3.14 ビジョンシステムの概略 40
3.15 ボールの運動復元結果 42

4.1 B スプラインによる曲面推定 47
4.2 平面と光線の交点 48

4.3 直線と曲面の交点計算 49
4.4 スプライン曲面と光線の交点の誤差 50
4.5 3 台の多眼カメラへ拡張 51
4.6 仮想パン · チルトカメラの配置 (3 台) 53
4.7 カメラの配置とターンテーブル 55
4.8 3 次元位置推定結果 57

5.1 Space Sweeping 法 60
5.2 エッジ間の距離の算出 61
5.3 カメラ配置に対するエッジの移動方向と奥行き推定例 64
5.4 カメラの配置と入力・エッジ画像 65
5.5 対応点候補の決定 66
5.6 各組み合わせによる統合距離の算出結果 67
5.7 奥行きの決定 68
5.8 非同期カメラにおける対応点候補 69
5.9 入力画像 70
5.10 シミュレーション実験による奥行き推定例 72
5.11 誤対応による奥行き推定誤差 73
5.12 定量的評価における入力画像 73
5.13 奥行きに対する真値の誤差 74
5.14 入力画像 75
5.15 実カメラ実験による奥行き推定例 76

6.1 カーブの成り立ち 79
6.2 クロソイド曲線の描画例 80
6.3 視線誘導標と夜間の見え 82
6.4 各部材の名称 83
6.5 反射体の大きさ 83
6.6 反射体と運転者等との関係 85
6.7 3 種類のフィルタ例 88
6.8 視線誘導標のモデルと応答値 89
6.9 座標系の定義 90
6.10 クロソイド曲線のパラメータマップ 93
6.11 視線誘導標の検出例 94
6.12 ヘッドライトのあるシーンでの視線誘導標の検出 95
6.13 各視線誘導標サイズの平均輝度分布と応答値 96
6.14 各曲線の当てはめ例 97
6.15 評価シーン 98

6.16 誤差の算出 99
6.17 精度とステレオ視の誤差の関係 100
6.18 xy 座標系におけるクロソイド曲線のパラメータマップ 102
6.19 視線誘導標の 3 次元位置にクロソイド曲線を当てはめた例 104

7.1 道路モデルの定義 107
7.2 道路の定義 107
7.3 大まかな中心点を算出 109
7.4 軸の変換 110
7.5 中心を曲線に当てはめる 110
7.6 α の算出 111
7.7 各曲線半径と勾配における CG 画像と道路構造 113
7.8 曲線半径 400 m に勾配をつけた路面に対する形状復元 116

表 目 次

2.1 各距離計測法のメリット，デメリットと応用例 22

3.1 3 次元位置と真値の平均誤差 (1 フレーム前) [mm] 36
3.2 3 次元位置と真値の平均誤差 (最新フレーム) [mm] 36
3.3 真値との誤差と標準偏差 [mm] 38

4.1 3 次元位置と真値の平均誤差 (1 フレーム前) [mm] 54
4.2 3 次元位置と真値の平均誤差 (最新フレーム) [mm] 54
4.3 真値との誤差と標準偏差 [mm] 55

5.1 直線との平均誤差 [mm] 71

6.1 支柱の諸元 84
6.2 反射性能 [cd/10.76 lx] 84
6.3 反射体の色，個数及び大きさ 86
6.4 標準設置間隔 [m] 86
6.5 視線誘導標の検出精度 [%] 95
6.6 分類精度 (752x480 pixel)[%]. 98
6.7 分類精度 (1920x1080 pixel)[%]. 101
6.8 ノイズを含んだ際の分類精度 (1920x1080 pixel)[%]. 103

7.1 道路の幅の平均値と真値との平均誤差 [mm] 113
7.2 道路の幅の平均値と真値との平均誤差 [mm] (勾配 2 度) 114
7.3 道路の幅の平均値と真値との平均誤差 [mm](勾配 5 度) 115

第1章

序論

本章では，本論文中の研究における背景および目的，構成について述べる．

1.1 本研究の背景

コンピュータビジョン (CV) の分野では，カメラから得られた 2 次元の画像から 3 次元形状を復元するという問題がある．この 3 次元画像計測は，アクティブ手法とパッシブ手法の 2 種類に大別することができる．アクティブ手法は，三角測量に基づく手法や TOF(Time-of-flight) 距離画像センサなどのように，アクティブに光などのエネルギーを放射し，その反射量から 3 次元計測を行う．一方パッシブ手法は，画像の特徴を利用して計測するものであり，一般的に，2 次元の画像から 3 次元の形状を復元するためには，2 台以上のカメラを使用し，カメラ間の画像中の対応を求めることで形状の復元を行う．このような形状復元には古くからステレオ視が使用され，現在までに様々な手法が提案されている．その中の 1 つであるマルチベースラインステレオ [1] は，複数のカメラを使用することにより高精度な 3 次元位置や形状の復元を可能とした手法である．近年，多眼カメラによる距離計測技術の進歩により，特にロボット視覚や ITS(Intelligent Transport Systems) の分野において実利用化が進んでいる．

ロボット視覚では，ロボットが動作する 3 次元の環境把握やピッキング作業における対象物までの距離の把握が重要であり，高精度な距離計測法が必要とされるため，多眼同期カメラによる距離計測法が利用されている．川田工業らにより開発されているヒューマノイドロボット HRP シリーズ [2] は，3 台のカメラを用いて 3 次元位置を計測し，人間との協調搬送などを実現している．富士通フロンテックで開発されている enon(エノン)[3] は，一台で案内・誘導，搬送，巡回・見回りなどのサービスを提供するロボットであり，頭部に搭載されている 3 組のステレオカメラを用いることで，広い視野での立体視が可能となっている．事前に利用環境 (建物など) のマップデータを与えておくことで，カメラの映像から現在位置を計算し，自律的に移動することができる．また，全方向の距離を算出することのできる SOS(Stereo Omni-directional Imaging System)[4] は，全方向の危険を察知するインテリジェント車いす [5] への適用が検討されている．以上のようなロボット視覚では，高精度な 3 次元情報を取得するために多眼同期カメラが使用されている．一方近年は，USB カメラ等の安価なカメラが普及している．このような非同期カメラを用いた 3 次元計測が取り組まれつつある [6, 7, 8, 9]．ステレオ視に必要な対応点を対象物の軌跡から推定する手法 [6, 7] や非同期画像間の関係を考慮したコスト関数を定義し，そのコスト関数を最小化することで，複数の 3 次元モーションに加え，時間ずれも推定する手法 [8]，電子シャッタースピードを遅くすることでボールの 3 次元軌跡の計測を行う手法 [9] である．このように，近年では多眼非同期カメラによる 3 次元形状復元への展開が行われている．

従来 ITS の分野では，レーザレーダ，ミリ波レーダなどのセンサにより 3 次元情報を取得し，安全運転のサポートシステムを構築していた．近年では，車両にカメラを設置し，CV 技術を応用したシステムや複合したシステムが開発されている．HONDA のナイトビジョン [10] は，夜間走行時に見えにくい前方の歩行者の存在をドライバーに知らせるシステムである．2 台の遠赤外線カメラのステレオ視により歩行者までの距離を算出し，算出した距離に基づいて対象物の相対的な位置や動きを判断して注意喚起を行う．さらに SUBARU の EyeSight はステレオカメラを使用して 3 次元位置を算出した結果と車両と歩行者の分類結果を用いて，衝突を防止するシステムが実現されている

[11, 12]．以上のようにCV技術の車載カメラへの応用は実用化され，ステレオカメラのように多眼カメラを用いたシステムも車両や歩行者の検知のために使用され始めている．

このようにロボット視覚やITSの分野では，CV技術が応用され，3次元情報を効果的に使用することが重要であると考えられる．

1.2 本研究の目的

本研究では，ロボット視覚やITSへ応用するために，多眼非同期カメラを用いて，リアルタイムに最新フレームの3次元位置を推定することを目的とする．

対象物の3次元位置を計測し，その結果を利用してロボットなどの制御をするためには，リアルタイム処理が必要である．非同期カメラにより3次元位置を復元する従来手法では，1フレーム前の3次元位置を出力する手法やリアルタイム処理が困難な手法である．そこで本研究では，リアルタイムに最新フレームの3次元位置を推定する手法を提案する．具体的な手法は，過去フレームの3次元位置を対象物の運動軌跡を補間することにより算出し，その3次元位置から最新フレームの3次元位置を推定する．運動軌跡は過去3フレームの画像座標を用いてスプライン曲線により補間する．このスプライン曲線とエピポーラ線の交点を擬似対応点としてステレオ視で3次元位置を求めることにより，過去フレームの3次元位置を得る．最新フレームの3次元位置は，過去3フレームの3次元位置に2次関数を当てはめることにより予測し，さらに光線情報の拘束を用いて補正することで得られる．本手法では，処理の単純化により処理コストを削減し，各カメラのシャッタータイミング毎に3次元位置を求めることで，1秒間にカメラの台数 $\times 30$ ポイントの3次元位置を得ることが可能となる．

さらに本研究では，提案手法で求めた3次元画像計測技術を車載カメラへ応用することも目的とする．現在実用化されているシステムは，車両や歩行者の検出のために，3次元情報を使用している．しかし，周囲の状況を認識するためには、車両や歩行者だけでなく，道路の形状を知ることは重要である．そこで我々は，人が視認することが困難な夜間の遠方領域の道路構造認識として，視線誘導標の3次元位置を用いた手法を提案し，近傍領域の道路構造復元として，白線の3次元情報を用いた手法を提案する．

1.3 本論文の構成

本論文の内容は，図 1.1 に示すように 8 つの章で構成されている．まず **1** 章は，序論である．**2** 章では，3 次元画像計測技術について述べ，**3** 章では，多眼非同期固定カメラによる高速 3 次元位置推定について述べる．非同期カメラにおけるステレオ視の問題点は，同一時刻の対応点が存在しないことである．そこで，画像平面上に擬似的な同一時刻の対応点を推定することにより，多眼非同期固定カメラによる 3 次元位置推定を実現する．評価実験により，カメラの台数 $\times 30$ ポイントの 3 次元位置を精度よく推定できることを示す．**4** 章では，**3** 章で提案した手法を可動カメラに展開する．3 次元空間中にスプライン曲面を生成することにより対象物の運動軌跡を補間し，この曲面と他方のカメラから得られる光線との交点を過去フレームの 3 次元位置とする．評価実験により，特定の対象物の 3 次元位置をステレオ視と同精度に推定することが可能であることを示す．**5** 章では，3 次元シーンの理解や認識のために，画像全体のエッジの 3 次元情報を求める手法を提案する．従来法である Space Sweeping 法は，仮定する z 平面の数に奥行き精度が影響するという問題がある．提案手法では，z 平面を移動した際のエッジの遷移を考慮することにより，z 平面に影響されない奥行き推定を実現する．評価実験により，提案手法は従来法より高精度に奥行きの推定が可能であることを示す．**6** 章では，**3** 章と **4** 章で提案した特定の対象物の 3 次元計測法の応用例として，視線誘導標の 3 次元位置を用いた道路構造認識について述べる．視線誘導標の 3 次元位置にクロソイド曲線を当てはめ，クロソイド曲線のパラメータをカーブの分類に利用する．CG 画像を用いた評価実験において，提案手法は右，左，右左，左右カーブを 86.9 % の精度で分類できることを示す．**7** 章では，**5** 章の画像全体のエッジの 3 次元計測法の応用例として，白線の 3 次元位置を用いた道路構造復元について述べる．評価実験により，複数の曲線半径および勾配をもつ道路に対して，道路構造の復元が可能であることを示す．最後の章は，結論である．

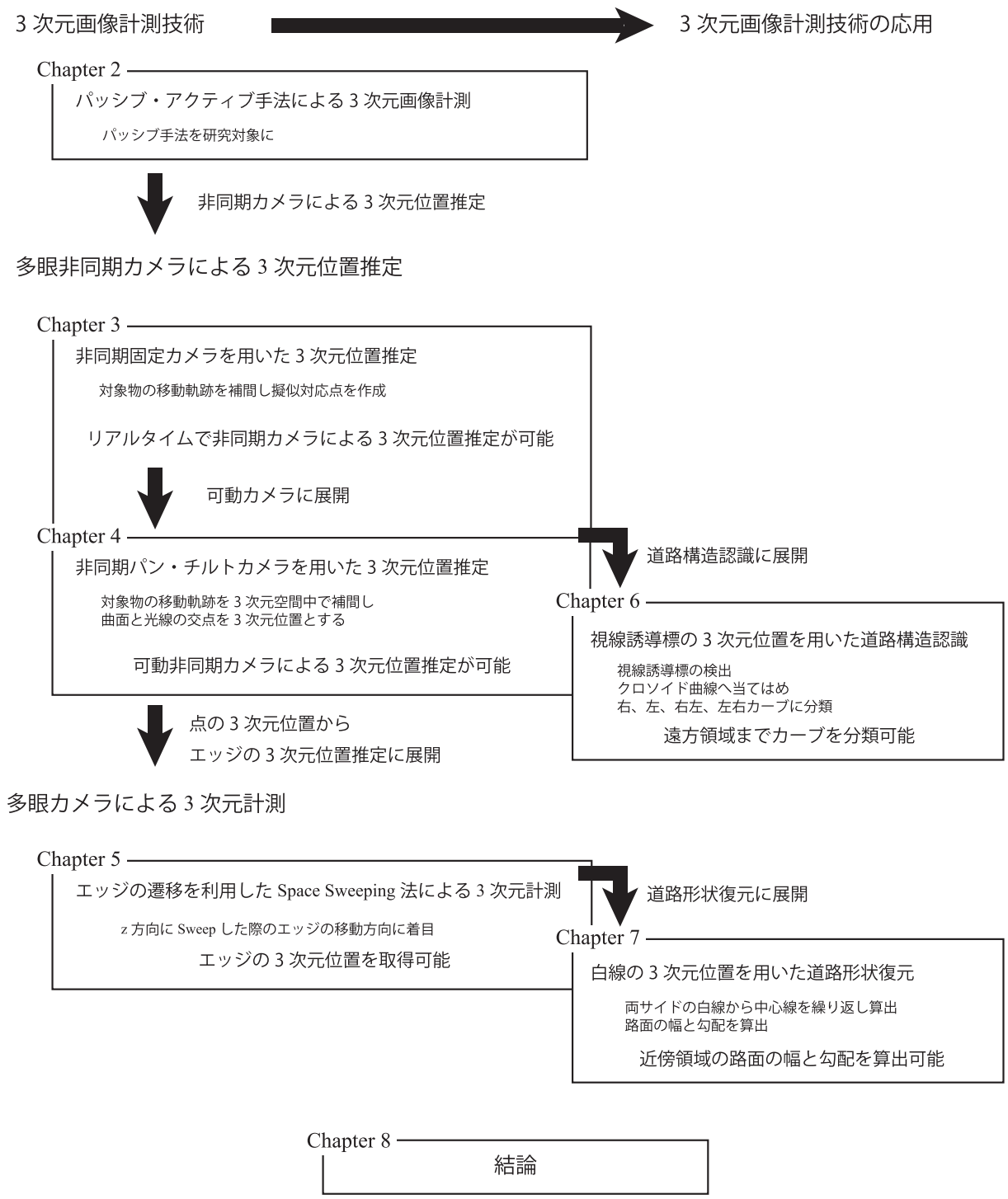

3 次元画像計測技術
3 次元画像計測技術の応用
Chapter 2
パッシブ・アクティブ手法による 3 次元画像計測
パッシブ手法を研究対象に
非同期カメラによる 3 次元位置推定
多眼非同期カメラによる 3 次元位置推定
Chapter 3
非同期固定カメラを用いた 3 次元位置推定
対象物の移動軌跡を補間し擬似対応点を作成
リアルタイムで非同期カメラによる 3 次元位置推定が可能
可動カメラに展開
Chapter 4
非同期パン・チルトカメラを用いた 3 次元位置推定
対象物の移動軌跡を 3 次元空間中で補間し
曲面と光線の交点を 3 次元位置とする
可動非同期カメラによる 3 次元位置推定が可能
道路構造認識に展開
Chapter 6
視線誘導標の 3 次元位置を用いた道路構造認識
視線誘導標の検出
クロソイド曲線へ当てはめ
右、左、右左、左右カーブに分類
遠方領域までカーブを分類可能
点の 3 次元位置から
エッジの 3 次元位置推定に展開
多眼カメラによる 3 次元計測
Chapter 5
エッジの遷移を利用した Space Sweeping 法による 3 次元計測
z 方向に Sweep した際のエッジの移動方向に着目
エッジの 3 次元位置を取得可能
道路形状復元に展開
Chapter 7
白線の 3 次元位置を用いた道路形状復元
両サイドの白線から中心線を繰り返し算出
路面の幅と勾配を算出
近傍領域の路面の幅と勾配を算出可能
Chapter 8
結論

図 1.1: 本論文の構成

第2章

3次元画像計測技術

1980年代から，ロボット視覚を適用した外観検査や生産システムの高度化が取り組まれ，実利用されている．ロボット視覚の主要な課題は，3次元世界に存在する対象物体の位置や姿勢の認識であり，高精度で高速かつ安価な3次元画像計測技術の実現に向けて，計測アルゴリズムや計測デバイスなどの研究が現在も取り組まれている．3次元画像計測は，パッシブ手法とアクティブ手法の2種類に大別することができる．パッシブ手法は，画像の特徴を利用して計測するものであり，代表的なものには多眼カメラを用いたマルチベースラインステレオがある．アクティブ手法は，三角測量に基づく手法やTOF(Time-of-flight) 距離画像センサなどのように，アクティブに光などのエネルギーを放射し，その反射量から3次元計測を行う．両手法ともに，メリット，デメリットが存在するが，目的に応じて利用することでロボット視覚の分野への応用が期待されている．本章では，3次元画像計測を主題とし，パッシブ手法とアクティブ手法による3次元画像計測について述べる．

2.1 画像入力の現状

カメラには，可視光カメラや赤外カメラ，紫外カメラなど様々な種類が存在する．3 次元画像計測には，画像のテクスチャ情報を用いた手法が多く使用されるため，一般に可視光カメラが用いられる．ロボット視覚として使用するには，カメラの映像を PC に取り込んで画像処理する必要がある．従来，キャプチャカード (PCI 接続) を介したアナログ入力が多く用いられてきたが，近年では，カメラリンクによるデジタル入力が普及してきている．また，USB2.0 や IEEE1394，ギガビットイーサネット (GigE) で接続可能なカメラが普及し，キャプチャカードを介さずに映像を PC へ記録することが可能となった．さらに，高帯域な PCIExpress を利用して多眼カメラの画像をリアルタイムで取り込むカメラシステムが登場している．このように，データ転送速度が向上したことで，高解像度画像の高速処理による画像計測が可能となりつつある．

多眼カメラによるステレオ視の際には，各カメラに同期信号を入力してカメラ間の同期をとる必要がある．そのため，同期信号発生器などの特殊な装置を必要とする．IEEE1394 接続のカメラでは，HUB を介してカメラ間が同期でき，同期信号発生装置などの特別な装置を必要としないものが市販されており，容易に多眼同期カメラシステムを構築することができる．

2.2 パッシブ手法による 3 次元画像計測

パッシブ手法は，2 台のカメラを用いたステレオ視 [13] から始まり，多眼カメラを用いたマルチベースラインステレオ [1] や 3 次元空間中の平面にエッジを投票することで対応点と距離計測を同時に行う Space Sweeping 法 [14, 15, 16]，非同期の問題を CV 技術で解決する多眼非同期カメラによる距離計測法 [17, 6, 7, 8, 9]，カメラに構造的工夫を施すことにより単眼カメラで距離計測を行う手法 [18, 19, 20] が提案されている．本節では，多眼同期カメラ，多眼非同期カメラ，単眼カメラによる距離計測法に焦点を置き，その動向について述べる．

2.2.1 多眼同期カメラによる距離計測法

古くから 2 台のカメラを用いたステレオ視や平行ステレオ，ステレオマッチングにより対象物の 3 次元空間の位置を求める手法が研究されている．より正確な対応点を求める手法としてマルチベースラインステレオ [1] がある．マルチベースラインステレオは，一つの基準となるカメラと，様々な長さや方向のベースラインを持つカメラのペアを構成し，複数のステレオ画像対から得られるマッチングコストを足し合わせる．そして，そのマッチングコストが最小となる位置を画像間の対応位置として決定することで，距離情報を測定することができる．

ロボット視覚では，ロボットが動作する 3 次元の環境把握やピッキング作業における対象物までの距離の把握が重要であり，高精度な距離計測法が必要とされるため，多眼同期カメラによる距離計測法が利用されている．川田工業らにより開発されているヒューマノイドロボット HRP シリーズ [2] は，3 台のカメラを用いて 3 次元位置を計測し，人間との協調搬送などを実現している．また，全

方向の距離を算出することのできる SOS(Stereo Omni-directional Imaging System)[4] は，全方向の危険を察知するインテリジェント車いす [5] への適用が検討されている．市販自動車にもステレオカメラが搭載され，車両と歩行者の分類結果と距離情報を用いて，衝突を防止するシステムが実現されている [11, 12].

Space Sweeping 法は，3 次元空間中に z 平面を作成し，その z 平面を z 軸方向に移動させながら z 平面に画像上のエッジを投票する．この投票数から，複数の画像間の対応点と，3 次元位置を同時に求める手法である．近年では，グラフカットなどを用いて，近傍情報を効果的に使用することで高精度な計測を実現している．また，GPU によるリアルタイム実装例も報告されている [15, 16]．本手法は，主に市街地などの 3 次元構造の生成 [16]，仮想焦点画像生成 [21] などの画像生成分野に利用されている．

以下に従来法である 2 台のカメラを用いたステレオ視，平行ステレオ，ステレオマッチング，マルチベースラインステレオ，Space Sweeping 法について詳しく述べる．

■ 2 台のカメラを用いたステレオ視

ステレオ視では図 2.1 に示すように，画像座標 (u^1, v^1) が与えられたとき，カメラと画像座標を結ぶ直線 (光線)l^1 が得られる．このとき，1 台のカメラからの光線では 3 次元空間中の任意の 1 点を求めることができない．しかし，その他のカメラの画像座標 (u^2, v^2) が認識された場合，そのカメラから求められる光線 l^2 との交点を求めることにより，3 次元位置を求めることが可能となる．

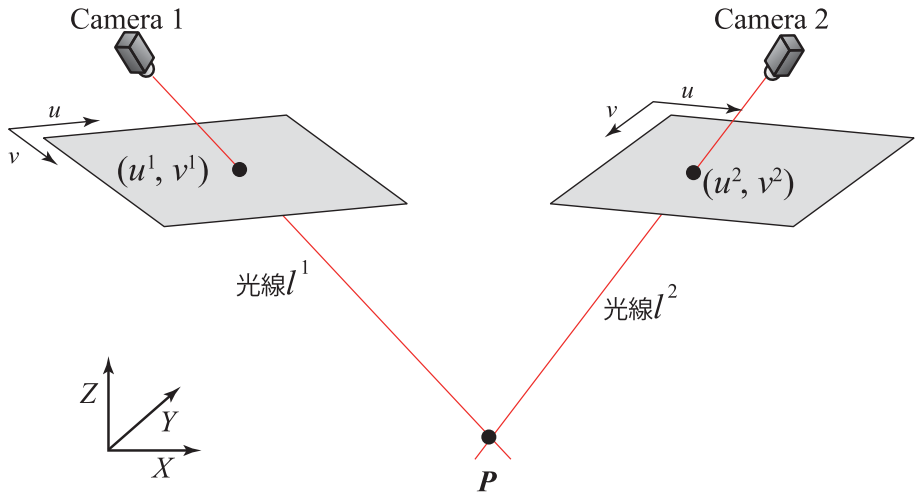


図 2.1: ステレオ視

3 次元空間中のある点 (X_w, Y_w, Z_w) の 2 台のカメラ画像上への投影点の画像座標を (u^1, v^1)，(u^2, v^2)

とするとき以下の式が成り立つ．

$$\tilde{\boldsymbol{m}}^1 \sim \boldsymbol{P}^1 \tilde{\boldsymbol{X}}_w, \qquad \tilde{\boldsymbol{m}}^2 \sim \boldsymbol{P}^2 \tilde{\boldsymbol{X}}_w \tag{2.1}$$

ただし，

$$\tilde{\boldsymbol{m}}^1 \sim \begin{bmatrix} u^1 \\ v^1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\boldsymbol{m}}^2 \sim \begin{bmatrix} u^1 \\ v^1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\boldsymbol{X}}_w \sim \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{2.2}$$

$$\boldsymbol{P}^1 = \begin{bmatrix} p^1_{11} & p^1_{12} & p^1_{13} & p^1_{14} \\ p^1_{21} & p^1_{22} & p^1_{23} & p^1_{24} \\ p^1_{31} & p^1_{32} & p^1_{33} & p^1_{34} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{P}^2 = \begin{bmatrix} p^2_{11} & p^2_{12} & p^2_{13} & p^2_{14} \\ p^2_{21} & p^2_{22} & p^2_{23} & p^2_{24} \\ p^2_{31} & p^2_{32} & p^2_{33} & p^2_{34} \end{bmatrix}. \tag{2.3}$$

また，$\boldsymbol{P}^1$，$\boldsymbol{P}^2$ は透視投影行列である．透視投影行列はカメラの内部・外部パラメータからなる行列であり，カメラキャリブレーションより求められているものとする．

式 (2.1) は 3 次元位置 (X_w, Y_w, Z_w) を未知数とする連立方程式となる．従って，式を変形することにより以下の式を得る．

$$\begin{bmatrix} p^1_{31}u^1 - p^1_{11} & p^1_{32}u^1 - p^1_{12} & p^1_{33}u^1 - p^1_{13} \\ p^1_{31}v^1 - p^1_{21} & p^1_{32}u^1 - p^1_{22} & p^1_{33}u^1 - p^1_{23} \\ p^2_{31}u^2 - p^2_{11} & p^2_{32}u^2 - p^2_{12} & p^2_{33}u^2 - p^2_{13} \\ p^2_{31}v^2 - p^2_{21} & p^2_{32}u^2 - p^2_{22} & p^2_{33}u^2 - p^2_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^1_{14} - p^1_{34}u^1 \\ p^1_{24} - p^1_{34}v^1 \\ p^2_{14} - p^2_{34}u^2 \\ p^2_{24} - p^2_{34}v^2 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

この連立方程式は未知数 3 に対し，方程式の数が 4 であるので，式を解くことにより 3 次元空間の位置 (X_w, Y_w, Z_w) を求めることが可能である．従って，ステレオ視では，画像間の対応が取れているならば，3 次元位置を得ることができる．

一方，カメラパラメータとして 2 つのカメラの内部パラメータ行列 $\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{A}'$ と，2 つのカメラ間の位置関係を表す回転行列 $\boldsymbol{R}$ と，平行移動ベクトル $\boldsymbol{T}$ をあらかじめ求めておく場合もある．このときは，一方のカメラ座標系を世界座標系とみなすことで，式 (2.1) における $\boldsymbol{P}$，$\boldsymbol{P}'$ を次のようにおくことにより，同様にして 3 次元位置を計算することができる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{P} &= \boldsymbol{A}(\boldsymbol{I}|0) \\ \boldsymbol{P}' &= \boldsymbol{A}'(\boldsymbol{R}|\boldsymbol{T}) \end{aligned} \tag{2.5}$$

■ 平行ステレオ

前節では，カメラの内部パラメータやカメラ間の位置関係が任意の一般的な場合の 3 次元推定法について述べた．本節では，それらを限定することで，簡単な式で 3 次元位置が計算できることを

示す．ステレオカメラに関し以下のような仮定をする (図 2.2 参照)．

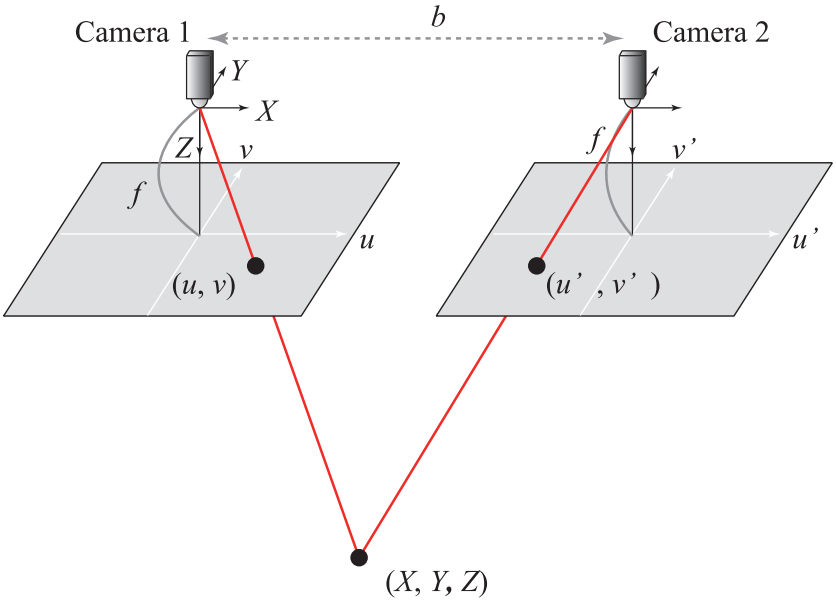


図 2.2: 平行ステレオ

- 2 台のカメラは内部パラメータが等しく，既知である．そこで，光軸と画像面の交点を原点とし，画素間隔を換算して世界座標系と長さの単位を合わせた画像座標をあらためて (u, v) と (u', v') とする．
- 2 台のカメラは，互いの光軸が平行で，u 軸と u' 軸が同一直線状で同じ向きになるように設置する．

このようなカメラ配置の場合を平行ステレオ (parallel stereo) と呼ぶ．上記の仮定は，式 (2.5) において，$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{A}'$，$\boldsymbol{R}$，$\boldsymbol{T}$ を以下のようにおくことに相当する．

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{A}' = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{I} \tag{2.7}$$

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} -b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

ここで，f はカメラの焦点距離，b は 2 台のカメラ間のベースラインである．

このとき，3 次元位置 (X, Y, Z) は，2 つの画像上の位置 (u, v) と (u', v') より，次式で計算される．

$$X = \frac{bu}{u - u'}, \qquad Y = \frac{bv}{u - u'}, \qquad Z = \frac{bf}{u - u'} \tag{2.9}$$

この式は，式 (2.6)～ 式 (2.8) の条件のもとに，式 (2.5) を解くことにより求めることができる．

式 (2.9) において，分母はすべて $u - u'$ である．この値は，2 つの画像上における投影点の横方向のずれ量であり，視差 (disparity) と呼ばれる．特に，空間点の奥行き Z は，b と f が一定であれば，視差 $(u - u')$ により一意に決まり，それと反比例の関係にある．すなわち，奥行きが小さい (対象が近い) とき，視差は大きな値となり，逆に奥行きが大きい (対象が遠い) と，視差は小さくなる．特に，奥行きが無限大になると視差は 0 に近づく．

■ ステレオマッチング

実際に，入力画像から 3 次元位置を求める際には，カメラ間で同一対象物であるという対応を求める必要がある．この対応点を求める処理をステレオマッチングとよぶ．ステレオマッチングではエピポーラ線等を用いて，探索範囲の制限を行っている．エピポーラ線とは，画像中に認識された対象物は，その画像座標を通る光線上の 3 次元空間に存在することから，その光線をその他の画像へ投影したときに現れる直線のことである (図 2.3 参照)．

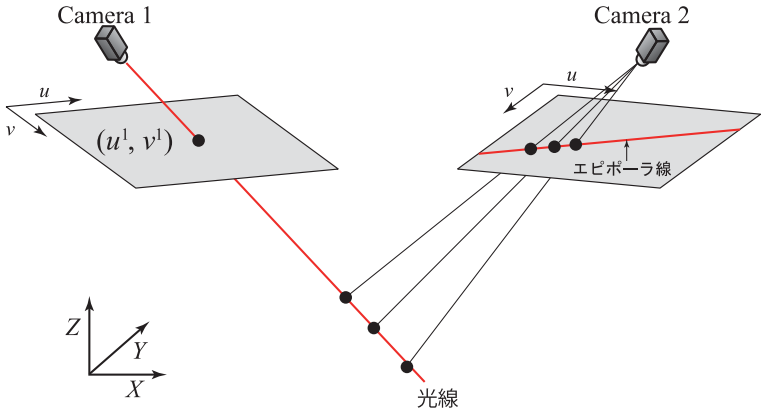


図 2.3: エピポーラ線

対応点の探索法として，テンプレートマッチングを利用して求める領域ベースマッチングや各画像でエッジやコーナーなどの特徴点を抽出し，その特徴点同士の対応を求める特徴ベースマッチングがある．図 2.4 にマッチング手法について示す．基準画像のある点を基準とする $M \times N$ pixel の輝度 I と，もう一方の画像座標中のエピポーラ線上の $M \times N$ pixel の輝度 T の類似度や相違度を求め，最小となるピクセルを基準画像点との対応点とする．相違度には以下の SSD(Sum of Squared

Difference) や SAD(Sum of Absolute Difference)，類似度には NCC(Normalized Cross-Correlation) が用いられる．

$$SSD = \sum_{j=0}^{N-1}\sum_{i=0}^{M-1}(I(i,j)-T(i,j))^2 \tag{2.10}$$

$$SAD = \sum_{j=0}^{N-1}\sum_{i=0}^{M-1}|I(i,j)-T(i,j)| \tag{2.11}$$

$$NCC = \frac{\sum_{j=0}^{N-1}\sum_{i=0}^{M-1}I(i,j)T(i,j)}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1}\sum_{i=0}^{M-1}I(i,j)^2 \times \sum_{j=0}^{N-1}\sum_{i=0}^{M-1}T(i,j)^2}} \tag{2.12}$$

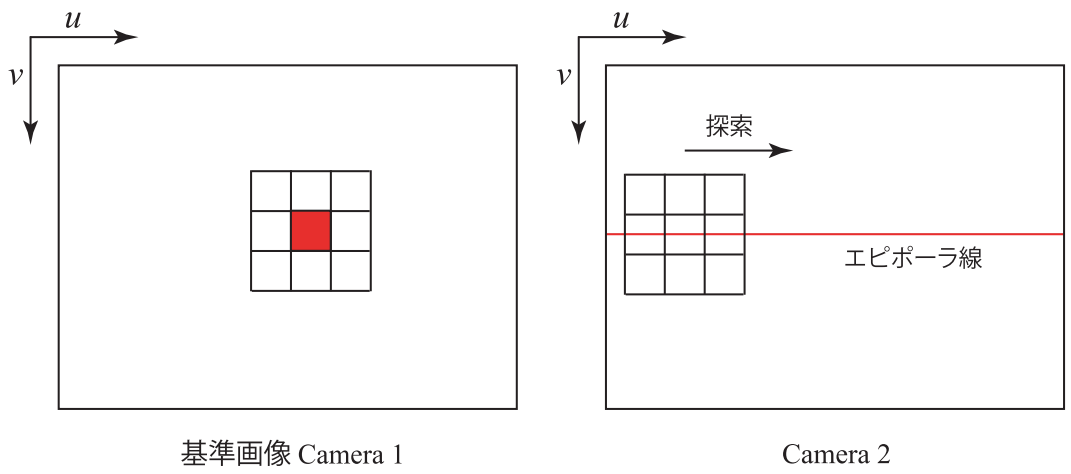


図 2.4: ステレオマッチング

■ マルチベースラインステレオ

より正確な対応を求める手法として，一組のカメラによるステレオ視だけではなく，より多くのカメラを用いるマルチベースラインステレオ [1] が提案されている．図 2.5 に示すように，1 台の基準となるカメラに対し，複数のカメラを配置する手法である．この手法では，カメラの台数が増加するに伴い，ステレオマッチングの誤対応が減り，精度を向上させることができる．

図 2.5 に示すように，カメラ位置を C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 とし，B_1, B_2, B_3, B_4 を各ステレオペアのベースラインとする．このとき，C_0 と C_1 の画像の x の輝度を $f_0(x)$，$f_1(x)$ と定義する．z を距離とすると，視差 $d_{r(i)}$ は以下の式で与えられる．

$$d_{r(i)} = \frac{B_i F}{z} \tag{2.13}$$

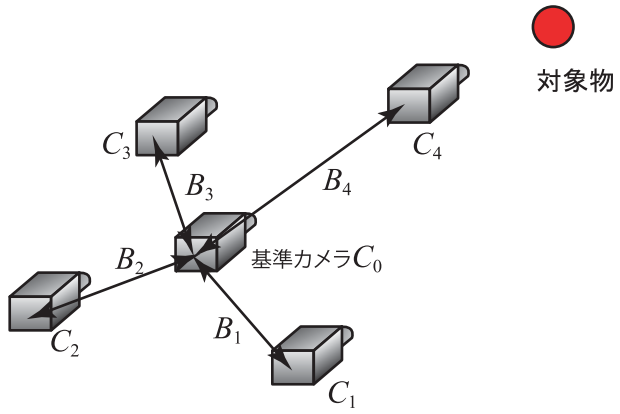


図 2.5: マルチベースラインステレオ

F はカメラの焦点距離である．次に対応点周辺の画像輝度関数を以下のように定義する．

$$\begin{aligned} f_0(x) &= f(x) + n_0(x) \\ f_i(x) &= f(x - d_{r(i)}) + n_i(x) \end{aligned} \tag{2.14}$$

$n_0(x)$，$n_1(x)$ は，ガウス白色ノイズとして以下の通り仮定する．

$$n_0(x), n_i(x) \sim N(0, \sigma_n^2) \tag{2.15}$$

まず，ウインドウの大きさを W として SSD 値 $e_{d(i)}(x, d_{(i)})$ を求める．

$$e_{d(i)}(x, d_{(i)}) \equiv \sum_{j \in W} (f_0(x+j) - f_i(x + d(i) + j))^2 \tag{2.16}$$

次に視差をそのステレオ画像のベースラインで割った値 (以後 ID と呼ぶ) を $\zeta = 1/z$ とすると，式 (2.13) から，

$$d_{r(i)} = B_i F \zeta_r \tag{2.17}$$

$$d_{(i)} = B_i F \zeta \tag{2.18}$$

を得る．ζ_r，ζ はそれぞれ実際と予測の ID である．式 (2.16) に式 (2.18) を代入することにより ID を持つ SSD 関数を得る．

$$e_{\zeta(i)}(x, \zeta) \equiv \sum_{j \in W} (f_0(x+j) - f_i(x + B_i F \zeta + j))^2 \tag{2.19}$$

最後に，全ての組み合わせによる SSD 値の合計を求め，この値が最小となる距離を出力とする．

$$e_{\zeta(12\cdots n)}(x,\zeta) = \sum_{i=1}^{n} e_{\zeta(i)}(x,\zeta) \tag{2.20}$$

式 (2.20) は確率変数であるので，評価値として以下の式を用いる．

$$\begin{aligned} E\left[e_{\zeta(12\cdots n)}(x,\zeta)\right] &= \sum_{i=1}^{n} E\left[e_{\zeta(i)}(x,\zeta)\right] \\ &= \sum_{i=1}^{n}\sum_{j\in W}(f(x+j)-f(x+B_iF(\zeta-\zeta_r)+j))^2 + 2nN_w\sigma_m^2 \end{aligned} \tag{2.21}$$

図 2.6 に示すように，各カメラの組み合わせによる SSD 値の最小値から距離を求めるので，推定精度が向上する．

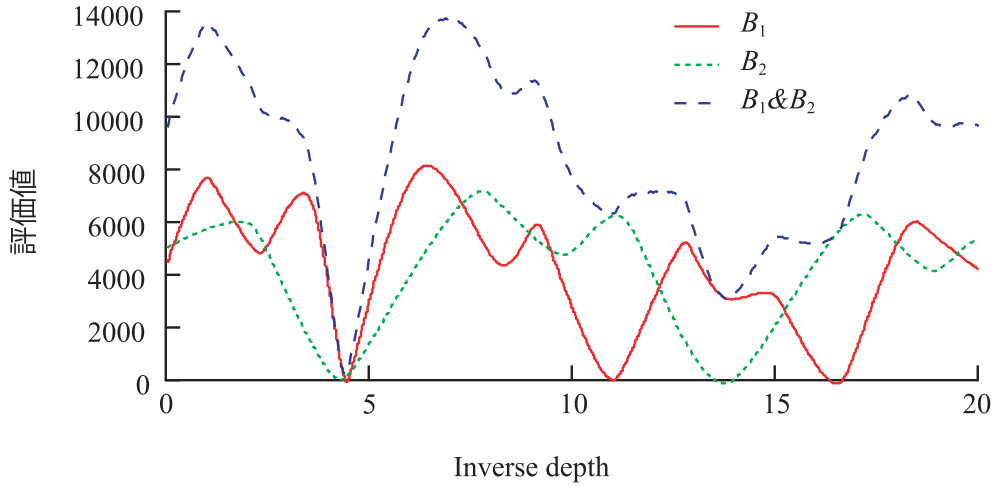


図 2.6: 各ペアごとの組み合わせ

■ Space Sweeping 法

Space Sweeping 法 [14] は，複数の画像間の点の対応と，3 次元位置を同時に求める手法であり，図 2.7 に示すように，同時に取得した各画像から Canny Edge Detector[22] を用いてエッジを算出し，そのエッジ点毎に光線を求め，その光線と高さ Z_n のスウィーピング平面との交点を求める．このスウィーピング平面はセルと呼ばれる領域に分割されており，交点のあるセルに交点の数を加算する．n 台のカメラを使用した場合，最大 n 個の投票が得られる．このとき，スウィーピング平面上に投影

される (x_0, y_0) と (x_i, y_i) は以下の関係式を用いることができ，射影の高速化ができる．

$$\begin{cases} x_i = \delta x_0 + (1-\delta)C_x \\ y_i = \delta y_0 + (1-\delta)C_y \end{cases} \tag{2.22}$$

$\delta = (z_i - C_z)/(z_0 - C_z)$ であり，$(C_x, C_y, C_z) = (-\boldsymbol{R}_1 \cdot \boldsymbol{T}, -\boldsymbol{R}_2 \cdot \boldsymbol{T}, -\boldsymbol{R}_3 \cdot \boldsymbol{T})$ は 3 次元空間の焦点位置である．$\boldsymbol{R_1}$，$\boldsymbol{R_2}$，$\boldsymbol{R_3}$ は，カメラキャリブレーションより求められる回転行列の列ベクトルであり，$\boldsymbol{T}$ は平行移動ベクトルである．式 (2.22) を用い，各カメラ画像におけるエッジ点を各 Z 平面ごとに投影し，セルの投票数がある閾値を満たしたとき，そこを 3 次元位置とする．

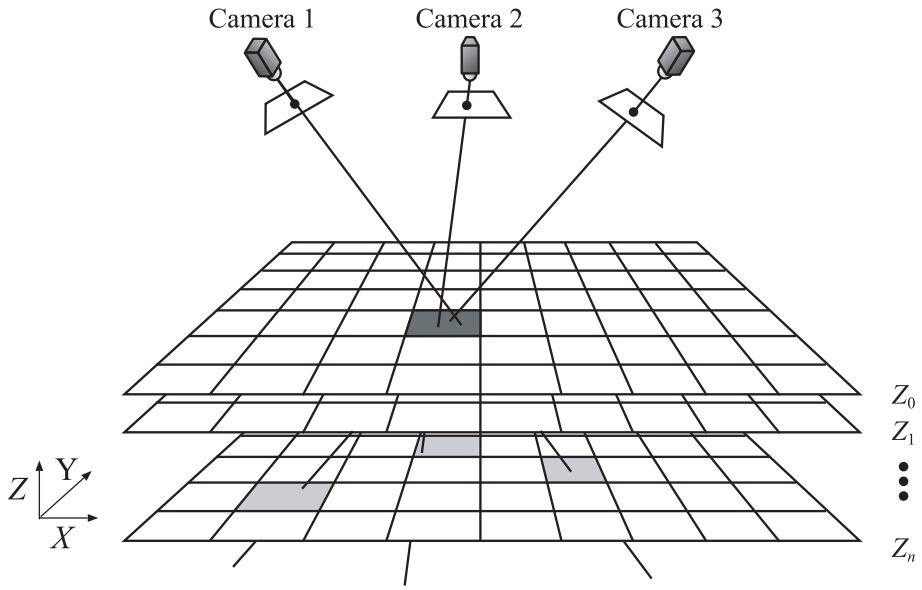


図 2.7: 光線との交点の投票

前述した全ての手法はカメラ間が同期していない場合に，いずれも誤差を含む結果となる．また，同期した場合には，カメラのフレームレートと 3 次元位置の出力が依存するため，高速に 3 次元位置を求めるためにはカメラ自体のフレームレートを高速にする必要がある．

2.2.2 多眼非同期カメラによる距離計測法

多眼同期カメラは，カメラ間の同期機構の設置にコストや手間がかかる．一方，近年安価な USB カメラが高解像度化し，低コストな多眼カメラシステムの構築に利用され始めている．USB カメラで構成された多眼非同期カメラは，ステレオ視で得られる同一時刻の対応点が算出できないという大きな問題があるため，カメラ間が同期していなくても，CV 技術を用いて 3 次元情報を求める手法が提案されている．

複数の非同期カメラを用いた人物追跡法 [23] では，多視点で非同期に得られる観測情報をカルマンフィルタにより統合し人物追跡を効率的に行う手法である．非同期に動作して各視点の画像を処理する複数の観測ノードと人物の追跡を行う追跡ノード，発見を行う発見ノードからなる．各観測ノードは追跡ノードから送られ，追跡モデルの更新が行われる．対応付けられない画像特徴は発見ノードに送られ，新規人物の発見に用いられる．このシステムでは，人体モデルとして床面に対して直立したものを仮定している．人体の中心軸が床面と接触する地点を人物位置と定義しており，3 次元空間中の点を求めていない．また，このシステムの観測ノードのサイクルは平均 5 fps である．

多眼非同期カメラを用いる際の問題を解決し 3 次元位置を推定する手法として，各フレームの画像から特徴点を算出し，フレーム間の対応を求めた後に，内挿法により存在しないフレームの対応点を算出する手法が提案されている．対応点の位置を高精度にするためにエピポーラ線の拘束を用いる手法 [17] や，フレーム間の対応をオプティカルフローで求める手法 [6]，その対応をスケール変化に不変な特徴量として知られている SIFT 特徴 [24, 25] で求める手法 [7] などが提案されている．これらの手法はフレーム間の対応点を求めた後に，他方のカメラに対応する時刻の対応点を内挿により求めることから内挿法による 3 次元位置推定法といえる．

一方，非同期ステレオ動画像を用いた動的シーンの位置とモーションの同時推定 [8] では，フレーム間で特徴点の対応付けを行う内挿法と違い，基準となる画像上の特徴点と最も類似している位置を対応付けたい画像すべてから同時に推定し，各点における距離と複数の 3 次元モーションに加え，時間ずれも推定する手法である．非同期画像間の関係を考慮したコスト関数を定義し，そのコスト関数を最小化することで，パラメータの同時推定を行う手法である．

最後に，電子シャッタースピードを遅くすることでボールの 3 次元軌跡の計測を行う手法 [9] について述べる．一般的に，高速に動くボールなどの対象物を撮影するときには電子シャッタースピードを速くし，ブレの少ない映像を撮影するが，本手法では電子シャッタースピードを故意に遅くすることによりボールの残像を発生させる．電子シャッタースピードをフレームレートと同じにすることで，複数の非同期カメラから得られるボールの残像は共通部分を多く持ち，視体積交差法を用いることで 3 次元軌跡を算出することが可能となる．

以上のように，多眼非同期カメラを用いた計測では，非同期の問題をアルゴリズム的に解決し，3 次元位置の推定を実現している．本手法は，家庭用ビデオカメラでの利用が可能であり，3 次元計測の個人利用への展開が期待される．

2.2.3 単眼カメラによる距離計測法

前述したように，一般に距離を計測するためには，複数のカメラが必要とされる．これは，3 次元空間中にカメラのレンズ中心と画像上の点を結ぶ光線が引かれるのみで，一意に 3 次元空間中の位置を決定することができないことからも明白である．しかし，単眼カメラに工夫を施すと，3 次元位置の推定が可能となる．その例として，フォーカスを変化させた画像を用いることによる距離の推定 (Depth from focus)[18] やレンズの球面収差を利用した手法 (蛍狩りカメラ)[19, 20] が挙げられる．

Depth from focus は，レンズのフォーカスを変化させることにより距離を計測する手法であり，一

般的に広く知られている手法である．一方，蛍狩りカメラは，球面収差の大きな光学レンズを利用することで，距離計測対象となる光源 (LED) をリング像として撮像し，そのリングの直径と中心位置から，点光源の距離と方向を決定し距離推定を行う手法である．カメラのレンズ中心から点光源までの距離はリングの直径を用いた関係式により推定し，点光源の中心位置と各軸との角度を求めることで点光源の 3 次元位置を推定することができる．

このようにカメラのフォーカスやレンズを工夫することにより，対象物体の距離を推定する手法が提案されている．蛍狩りカメラは，リアルタイム処理が可能であり，アスリートの運動解析やモーションキャプチャの分野へ展開されている．

2.3 アクティブ手法による 3 次元画像計測

本章では，アクティブ手法についてまとめる．手法の概要を述べた後，三角測量に基づく手法，および最近注目されている TOF 距離画像センサについて解説する．なお，詳細なサーベイに関しては，文献 [26, 27] などを参照されたい．

2.3.1 アクティブ手法の概要

これまでに実現されているアクティブ手法の多くは，(a) 光路のずれ，(b) 光の飛行時間，のいずれかを利用することで距離を計測する（図 2.8 参照）．

(a) は，対象に投光した光が反射して戻ってくる時の光路のずれを利用し，三角測量の原理に基づいて距離を得るというものである．モアレ法 [28] も広い意味でこの枠組みに含まれると考えられる．

(b) は，対象に投光した光が反射して戻って来る時間を測定し，光の速度を掛けて 2 で割ることで距離を得るというものであり，飛行時間法 (TOF 法，Time-of-flight method) と呼ばれている．超音波やマイクロ波を用いた距離計測と同じ原理である．

(a) と (b) には，計測対象までの距離に対する計測の不確かさの特性に大きな違いがある．(a) では距離の大小により不確かさが大きく変化する．すなわち，対象が遠くなるに従い，光路のずれが急速に小さくなって不確かさが大きくなる．これによる不確かさは一般に距離の二乗に比例する．一方 (b) では，不確かさが距離にそれほどよらない．時間の計測の誤差が距離の影響をそれほど受けないためである．以上の特性により，一般に，近距離の計測では (a) が，遠距離の計測においては (b) が有利である．

2.3.2 三角測量に基づく手法

ステレオ法のカメラの一台を投光器に置き換え，スポット光，スリット光などを投影し，三角測量の原理で距離を求める一連の手法である．ステレオ法と比較すると，左右の画像間で対応する点を求める対応点問題を回避することができ，ステレオ法で困難なテクスチャの少ない箇所での距離の

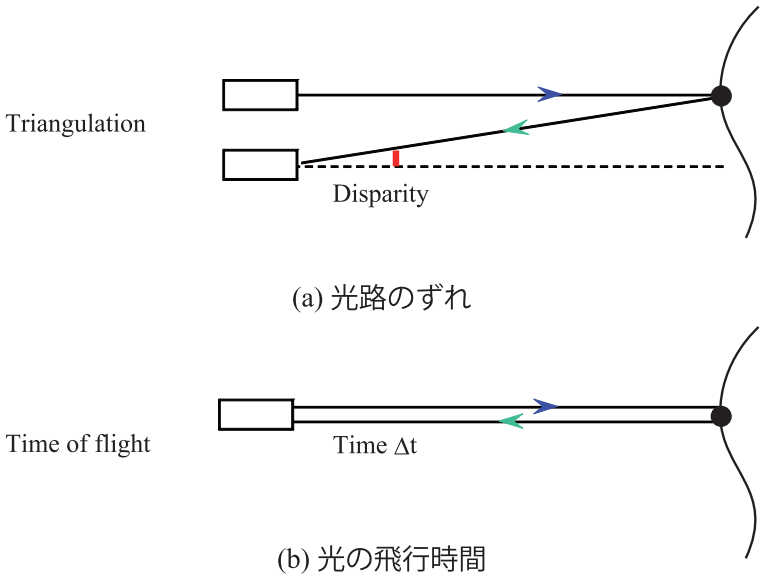


図 2.8: アクティブ手法による距離計測の基本原理

計測が問題なく実現できるという利点がある．実用性が高いため，多くの研究開発が行われており，製品化されているものも多い．

(1) スポット光のスキャン

レーザスポット光を投光し，投影された点までの距離を求める．距離画像を得るためには，二次元方向にスキャン（走査）する必要がある．カナダ NRC（国立研究所）の Synchronized Laser Scanner[29, 30] が有名である．本センサのスキャンメカニズムは巧みである．スキャンに用いる鏡の裏面が表面に平行な鏡になっており，物体に投影されたスポット像はこの裏面の鏡で反射されてライン CCD などの受光素子上に結像される．スキャンするのが鏡だけなので高速な計測が可能であり，かつスキャンによる計測方向の変化によらず受光素子の全域をレンジとした計測が可能で，10 μm オーダの高精度・高分解能の計測を実現している．さらに，光源として R, G, B の 3 色のレーザを合成した白色レーザを投光し，戻ってきた光をプリズムで分光してそれぞれの結像強度を得ることで対象の色情報も同時に得るセンサも開発されている．本センサは，文化遺産の 3 次元アーカイブ作成 (最近ではモナリザが話題になった)，映画製作における 3 次元モデル取得，スペースシャトルでの耐熱タイルのはがれの検査などに用いられている．

(2) スリット光のスキャン

光切断法とも呼ぶ．古くからあり [31]，多くの産業に応用されている．スリット光を投影して画像を入力し，スリットの位置を計測することで，一列分の距離を計測する．これを一次元方向にスキャンすることで距離画像を得る．スリットをスキャンする本数分の画像を入力する時

間が必要である．一般的な CCD カメラを使うと一枚の画像入力に 1/30 s(フレームレート) 要するため距離画像の計測に時間を要するが，高速の CCD を用いるなどで高速化が図られている．また，光切断法の一種の拡張として，符号化された ON/OFF パターンの画面を時系列に投影することによって，スリット数を n とした時に必要なスキャン数を n から $\log 2n$ のオーダに減らす時系列符号化法が知られている [32]．佐藤らが開発し製品化した Cubicscope[32, 33] や Cartesia はこの時系列符号化法を利用したセンサであるが，時系列パターンを作成するために，スリット光を高速にスキャンしながら ON/OFF するという工夫をしている．0.3 s で 512×242 画素の距離画像を計測することができる [33]．また，スリットではなく正弦波を時系列に投影して位相から対応を求める空間位相シフト法も提案され，製品化されている．さらに，受光素子に二次元状に配置した多数のタイマつきフォトセンサアレイを用いることによって高速な計測を実現している研究がある [32, 34]．スリット光を一定速度でスキャンした時にスリット像が各フォトセンサ上を通過する時間を求めることで各フォトセンサに対応するスリット光の方向を求め，三角測量を行う．

(3) マルチスポット光

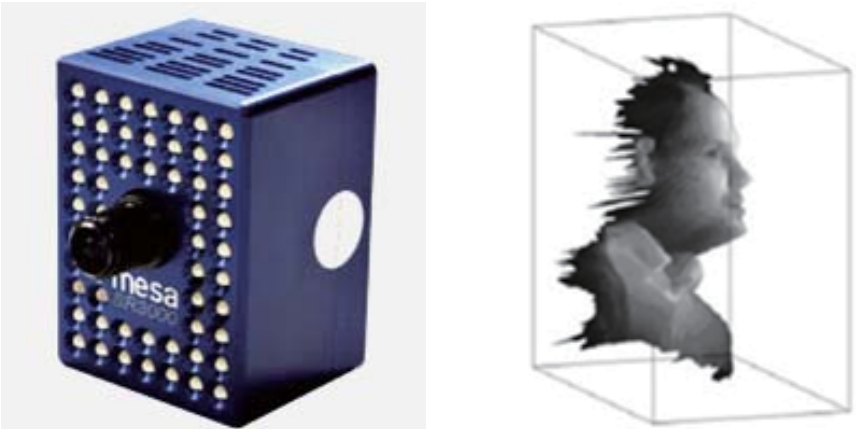
多数のスポット光を投影し，各スポット光までの距離をスキャンレスで計測する．スポット光が多数になることにより対応点問題が再度生じるが，計測レンジを限定することなどでこの問題を回避できる．計測レンジとのトレードオフで計測点数を多くできないという欠点はあるが，機械的な可動部がなく，実時間での計測が可能という利点がある．中澤，中島らは光ファイバーグレイティングを回折格子として利用して多点スポット光の投影を実現した [35]．中島らはこの方式のセンサを無呼吸症候群の検出などの医療用途に用いている．同様の原理を用いて，移動ロボットなどでの利用を想定した小型距離画像センサも開発されている．市販のレーザプロジェクタと高速の CCD カメラを用いて 361 点からなる距離画像を 200Hz で計測する [36]．さらに，バンドパスフィルタの装着で屋外での計測も可能である [37]．

2.3.3 TOF 距離画像センサ

光を照射し，対象物から反射してくる時間から距離を計測する．パルス光を照射して時間を計測するものもあるが，時間そのものを計測するのではなく，光を数十 MHz 程度の正弦波で変調して投影し，投影光と反射光との間の位相差を測定して距離に換算するものが多い．単純に一つの位相差だけを見ると同位相を与える距離が複数生じてしまうため，複数の波長の変調波を用いることで測距の冗長性をなくすことなども行われている．

これまでに提案され製品化されてきたものは，スポット光（一般にはレーザ）を照射して一点の距離を計測し，距離画像を得るには，二次元方向にスキャンするものである．ロボティクス応用などに，北陽電機の URG や SICK のセンサが良く用いられている．

最近，イメージセンサのすべての素子で同時に位相差を計測する手法が提案されている．この手法を用いたものはスキャンが不要でかつ実時間で距離画像を得ることが可能であるため，注目されてい



(a) 外観　　(b) 距離画像計測例

図 2.9: Swiss Ranger SR-3000

る．本手法は，特別な固体撮像素子を用い，撮像素子の各素子で TOF での距離計測を実現することで，スキャンレスでの距離画像計測を実現するというものである．赤外 LED アレイを用いて変調光を照射し，特別な固体撮像素子を用いたカメラで撮像する．この固体撮像素子の各素子では，電荷蓄積時にゲートを高速に制御する機能があり，これを利用することで各素子での TOF を実現する．市販品の一つである Swiss Ranger（図 2.9 参照）で用いられている技術 [38, 39] を例に示す．なお，他にも松下電工やカネスタなどから同様のセンサが市販されている．

- 赤外 LED の波長は 850nm，55 個の LED を利用し，計 1W の赤外光を照射
- 変調周波数は 20MHz，よって変調波の波長は 15m．往復なので計測レンジは半分の 7.5m まで
- 90 度ずつ位相が異なる四点で反射光をサンプリング

この 4 つの値からオフセット（環境光と反射光の和），振幅 (反射光)，反射光の位相が計算され，反射光の位相から距離が，オフセットからは輝度値が得られる．

2.4　各距離計測法の応用例

表 2.1 にパッシブ手法とアクティブ手法による距離計測法のメリット，デメリットおよび応用例を示す．

パッシブ手法は，カメラのみを使用するため，比較的安価に 3 次元計測システムを実現できる．ステレオマッチング等の計算処理コストが高いが，ハードウエア化によりリアルタイム処理も可能となり，ロボットや車などに実利用化されている．

一方，アクティブ手法は，投光投影装置などの特殊な装置が必要となり高価である．その反面，高精度に 3 次元形状の計測が可能である．特に TOF 距離画像センサは，小型でかつリアルタイム処理が可能である．しかし，低解像度という問題があるため，今後高解像度化することで産業用ロボットへの実利用が大いに期待される．

表 2.1: 各距離計測法のメリット，デメリットと応用例

	手法	メリット	デメリット	応用例
パッシブ手法	多眼同期カメラ	応用分野が広い 精度が高い	同期機構が必要 計算コストが高い	ロボット視覚 市街地の 3 次元地図の生成 インテリジェント電動車いす 車載カメラ 仮想焦点画像生成
	多眼非同期カメラ	カメラの設置が簡易	精度が同期カメラに劣る	家庭用カメラを用いた 3D 映像の生成 動的シーンの位置とモーション推定 運動解析
	単眼カメラ	対応点の探索が不要 リアルタイム処理が可能	カメラが特殊	運動解析 簡易モーションキャプチャ
アクティブ手法	三角測量に基づく手法	テクスチャから受ける影響が少ない 高精度	投影装置が必要	３次元アーカイブ 映画作成における３次元モデル取得 外観検査
	TOF 距離画像センサ	短時間で計測可能	低解像度 屋外での測定	ロボット視覚 ３次元情報入力デバイス

2.5 まとめ

3 次元画像計測技術の分野において，パッシブ手法とアクティブ手法について解説した．パッシブ手法では，多眼カメラ，多眼非同期カメラ，単眼カメラにおける 3 次元画像計測技術について述べ，アクティブ手法では，三角測量に基づく手法と TOF 距離画像センサについて述べた．多眼カメラでは，カメラ間が同期している手法が多くあり，アクティブ手法に比べ安価に高精度な 3 次元画像計測が期待できる．さらに，古くから研究されている分野であるため，ロボットや車両などへの実利用が取り組まれている．

一方，多眼非同期カメラは，対応点を擬似的に生成する手法や各点における距離と複数の 3 次元モーションに加え，時間ずれも推定する手法，カメラの電子シャッターを遅くすることで，カメラ間の時間ずれを補う手法が提案されており，非同期カメラを用いた研究が近年増えている．しかし，発展途上であるためリアルタイム処理などが十分に検討されていない．そこで本研究では，非同期カメラを用いたリアルタイム処理可能な 3 次元位置推定法を提案する．

3 章と **4** 章において，非同期カメラを用いた場合にステレオ視で問題となる対応点の算出法を検討し，多眼非同期カメラにおける 3 次元位置推定法を提案する．**5** 章では，Space Sweeping 法における z 平面の移動間隔や投票空間の設定問題を解決するための改良法について提案する．そして，**6**

章と **7** 章に応用例として，遠方領域の視線誘導標を用いた道路構造の認識と，白線を用いた近距離領域の道路構造の復元について提案する．

第3章

多眼非同期固定カメラによる高速3次元位置推定

ロボットを迅速にかつ正確に制御するためには，ビジュアルフィードバックのサイクルを高速に行う必要があり，特に，カメラから得られる画像から有用な情報を得るための高速なビジョンシステムが不可欠となる．その際には，ロボットやボール等の対象とする物体の 3 次元位置を正確に検出する必要がある．そこで，非同期カメラによる高速 3 次元位置推定について提案する．**3.1** では，同期と非同期のシャッタータイミングについて述べ，非同期におけるステレオ視の問題点について述べる．**3.2** では，過去 2 フレームを用いた最新フレームの算出法について述べ，**3.3** において，過去 2 フレームの 3 次元位置を固定非同期カメラで算出する手法を述べる．**3.4** では，多眼カメラへの拡張について述べる．**3.5** では，シミュレーション実験と実際のカメラを使用した実験について述べ，提案手法の評価を行う．

3.1 非同期カメラにおけるステレオ視の問題点

2 台のカメラを用いた際のシャッタータイミングの組み合わせを図 3.1 に示す．図 3.1(a) は同一のシャッタータイミングであり，ステレオ視で用いられるシャッタータイミングである．ステレオ視では，30 fps のカメラを用いた場合，最大 30 fps で対象物の 3 次元位置を推定することが可能である．図 3.1(b) は，USB カメラなどの同期機構を持たないカメラのシャッタータイミングである．対象物が動いている際，2 台の非同期カメラを用いたステレオ視ではカメラ間の時間ずれを含んだ対応点により対象物の 3 次元位置を推定することになる．そのため，推定した 3 次元位置 $\hat{\boldsymbol{P}}_{t+1}$ は図 3.2 のように誤差を含む．このように，固定非同期カメラから対象物の 3 次元位置を求めるには，時間ずれ δ を考慮する必要がある．そこで本章では，非同期のシャッタータイミングで未知の時間ずれ δ に依存しない 3 次元位置の推定法を提案する．また，各カメラのシャッタータイミング毎に 3 次元位置を出力するため，1 秒間にカメラの台数 ×30 点の出力を可能とする．

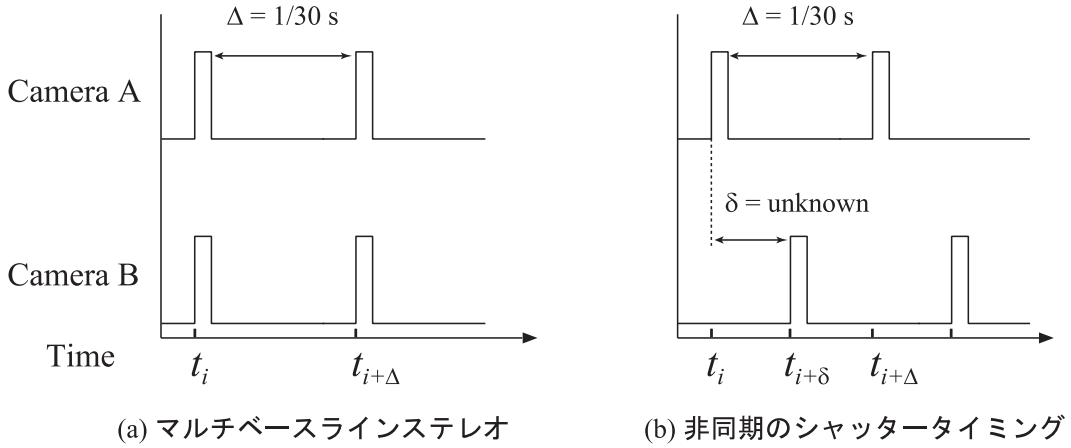


図 3.1: 2 台のカメラにおけるシャッタータイミングの組み合わせ

3.2 最新フレームの 3 次元位置推定

最新フレームの 3 次元位置 $\boldsymbol{P}_t = [x_t\ y_t\ z_t]^T$ を図 3.3 に示すように過去 3 フレームの 3 次元位置 $\boldsymbol{P}_{t-1}$ と $\boldsymbol{P}_{t-2}$，$\boldsymbol{P}_{t-3}$ から推定する．過去 3 フレームの 3 次元位置を 2 次関数に近似し，最新フレームの 3 次元位置を予測する．最新フレームの 3 次元位置は，最新フレームで観測された点の光線上に存在するはずであるので，予測した 3 次元位置と光線に最も近い光線上の点を最新フレームの 3 次元位置とする．以下に最新フレーム t の画像がカメラ B によって撮影された場合に最新フレーム t の 3 次元位置 $\boldsymbol{P}_t$ を推定する手順を示す．

Step1 対象物の 3 次元空間中の運動を予測するために，3 次元座標 $\boldsymbol{P}_{t-1}$=$[x_{t-1}\ y_{t-1}\ z_{t-1}]^T$，$\boldsymbol{P}_{t-2}$=

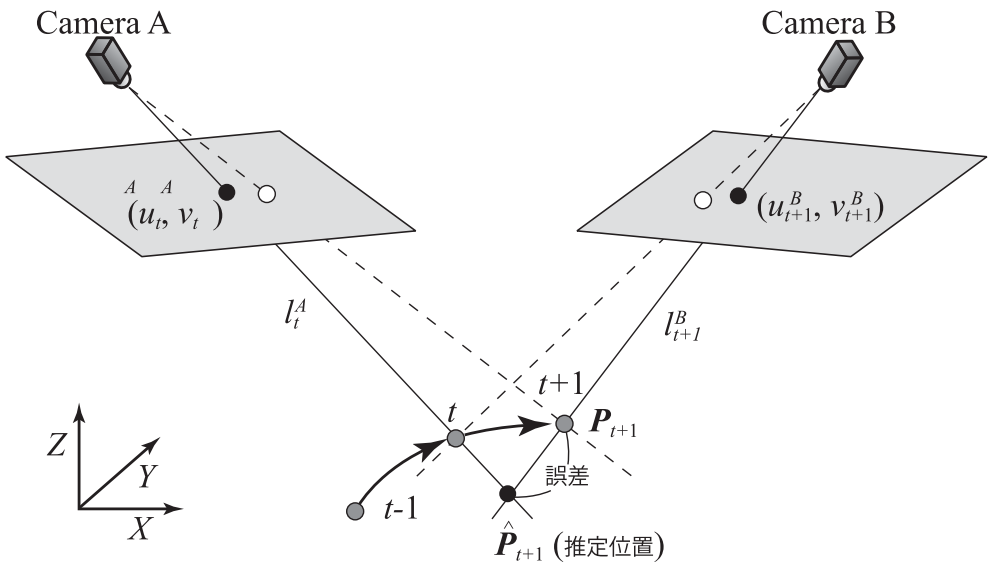


図 3.2: 非同期カメラにおける時間ずれによる誤差

$[x_{t-2}\ y_{t-2}\ z_{t-2}]^T$，$\boldsymbol{P}_{t-3} = [x_{t-3}\ y_{t-3}\ z_{t-3}]^T$ を用いて以下の式に当てはめ $a_1 \sim c_3$ の 9 個のパラメータを推定する．s は媒介変数とする．

$$\boldsymbol{L}(s) = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s^2 \\ s \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Step2 $\boldsymbol{P}_{t-3}$ から $\boldsymbol{P}_{t-1}$ 間の式 (3.1) における媒介変数 s の値を $0 < s \leq 1$ とすると，最新フレームの 3 次元位置は $1 < s \leq 2$ に存在する．したがって，最も遠い最新フレームの 3 次元位置は媒介変数 $s = 2$ を式 (3.1) に代入することにより得られる．

$$\boldsymbol{P}_t^{max} = \boldsymbol{L}(2) \tag{3.2}$$

Step3 光線 l_{ray}^B に最も近い曲線 $\boldsymbol{L}(s)$ 上の 3 次元位置を算出する．光線 l_{ray}^B は，以下の式で表すことができ，世界座標の原点からカメラ B のレンズ中心への平行移動ベクトル $\boldsymbol{T}^B = [T_x^B\ T_y^B\ T_z^B]^T$，画像座標 (u_t^B, v_t^B) への光線 l_{ray}^B の単位方向ベクトル $\boldsymbol{r}_t^B = [\lambda\ \mu\ \nu]^T$ から算出する．

$$\frac{x - T_x^B}{\lambda} = \frac{y - T_y^B}{\mu} = \frac{z - T_z^B}{\nu} \tag{3.3}$$

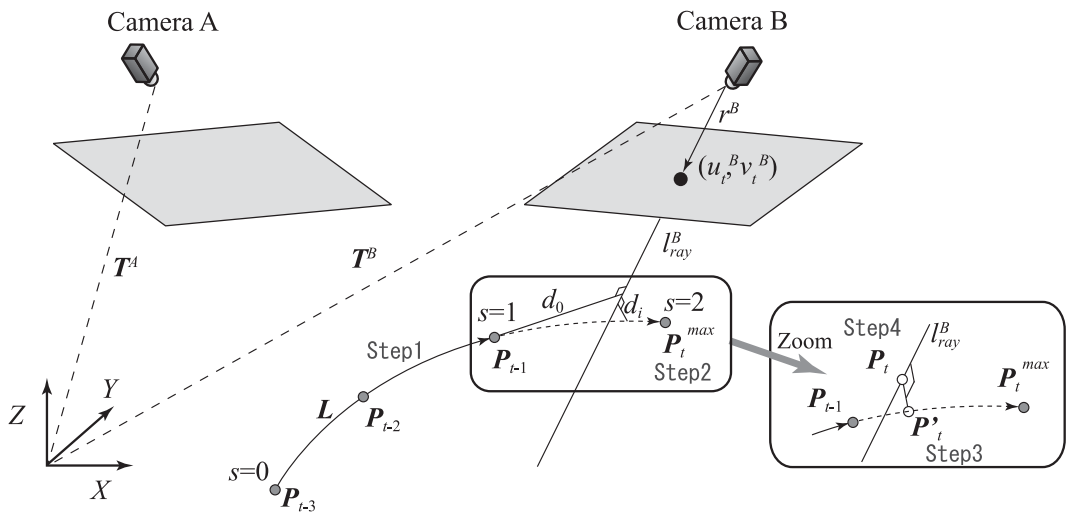


図 3.3: 最新フレームの 3 次元位置推定

光線 l_{ray}^B と曲線 $\boldsymbol{L}(s)$ の 3 次元位置 $\boldsymbol{L}(s) = [x_s\ y_s\ z_s]^T$ の距離 d は以下の式で計算できる．

$$
\begin{aligned}
d(\boldsymbol{L}(s)) &= \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \\
A &= \mu(x_s - T_x^B) - \lambda(y_s - T_y^B) \\
B &= \nu(y_s - T_y^B) - \mu(z_s - T_z^B) \\
C &= \lambda(z_s - T_z^B) - \nu(x_s - T_x^B)
\end{aligned}
\tag{3.4}
$$

曲線 $\boldsymbol{L}(s)$ と光線 l_{ray}^B との最少距離となる 3 次元位置を $\boldsymbol{P}'_t$ として選択する．

$$
\boldsymbol{P}'_t = \underset{(1 < s \leq 2)}{\arg\min}(d(\boldsymbol{L}(s))) \tag{3.5}
$$

Step4 最新フレーム t の 3 次元位置は図 3.3 のように光線 l_{ray}^B 上に存在するため，3 次元位置 $\boldsymbol{P}'_t$ から最も近い光線上の点を 3 次元位置 $\boldsymbol{P}_t$ とする．

$$
\boldsymbol{P}_t = \frac{(\boldsymbol{P}'_t - \boldsymbol{T}^B) \cdot \boldsymbol{r}^B}{|\boldsymbol{r}^B|^2} \boldsymbol{r}^B + \boldsymbol{T}^B \tag{3.6}
$$

図 3.4 に示すように，以上の処理を各カメラのシャッタータイミング毎に行うことにより，最新フレームの 3 次元位置を高速に得ることが可能となる．また，最新フレームがカメラ A のときも同様に，最新フレームの 3 次元位置 $\boldsymbol{P}_t$ は添え字を変えることにより推定可能である．

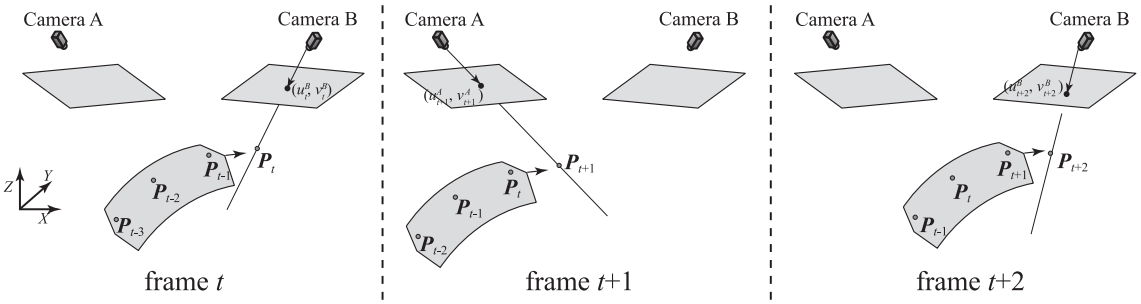


図 3.4: 各シャッタータイミングによる最新フレームの 3 次元位置推定

3.3 固定非同期カメラにおける過去フレームの 3 次元位置推定

2 台のカメラのシャッタータイミングは非同期のため，各カメラ画像は交互に取得される．したがって，ステレオ視で 3 次元位置を求めるための同時刻における対応点が存在しない．そこで本節では，図 3.5 に示すように，存在しないフレームの対応点を擬似的に作成し，その擬似対応点と実際に観測した点を用いて，ステレオ視により 3 次元位置を求める手法を提案する．各カメラ間のシャッタータイミングの時間ずれである δ_{AB}，δ_{BA} は未知であるため，時間を用いた内挿法による推定が不可能である．そこで，同一カメラ画像上の観測された過去の点の座標から対象物の軌跡を推定し，エピポーラ線との交点を求めることで擬似対応点を算出する．そして，その擬似対応点と観測点を用いてステレオ視により 3 次元位置を求める．

3.3.1 2 次のスプライン曲線による擬似対応点の作成と 3 次元位置推定

提案手法では，対象物の軌跡を推定し，その軌跡と存在しないフレームのエピポーラ線との交点を求めることで擬似対応点を取得する．そのため，3 次元位置の精度は運動軌跡に依存する．運動軌跡を線形であるととらえると，実際の運動が線形でない場合，図 3.6 に示すような誤差が発生する．そのため，本手法では，スプライン曲線により運動軌跡を捉える．以下にスプライン曲線とエピポーラ線の交点を擬似対応点とする過去フレームの 3 次元位置推定法の流れを示す．

Step1 カメラ B において，最新フレームを含む過去 3 フレームの実際に観測された 3 点 (u_t^B, v_t^B)，(u_{t-2}^B, v_{t-2}^B)，(u_{t-4}^B, v_{t-4}^B) から，次式で示す 2 次のスプライン曲線を得る．

$$u(s) = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i B_{i,K}(s), v(s) = \sum_{i=0}^{N-1} \beta_i B_{i,K}(s) \tag{3.7}$$

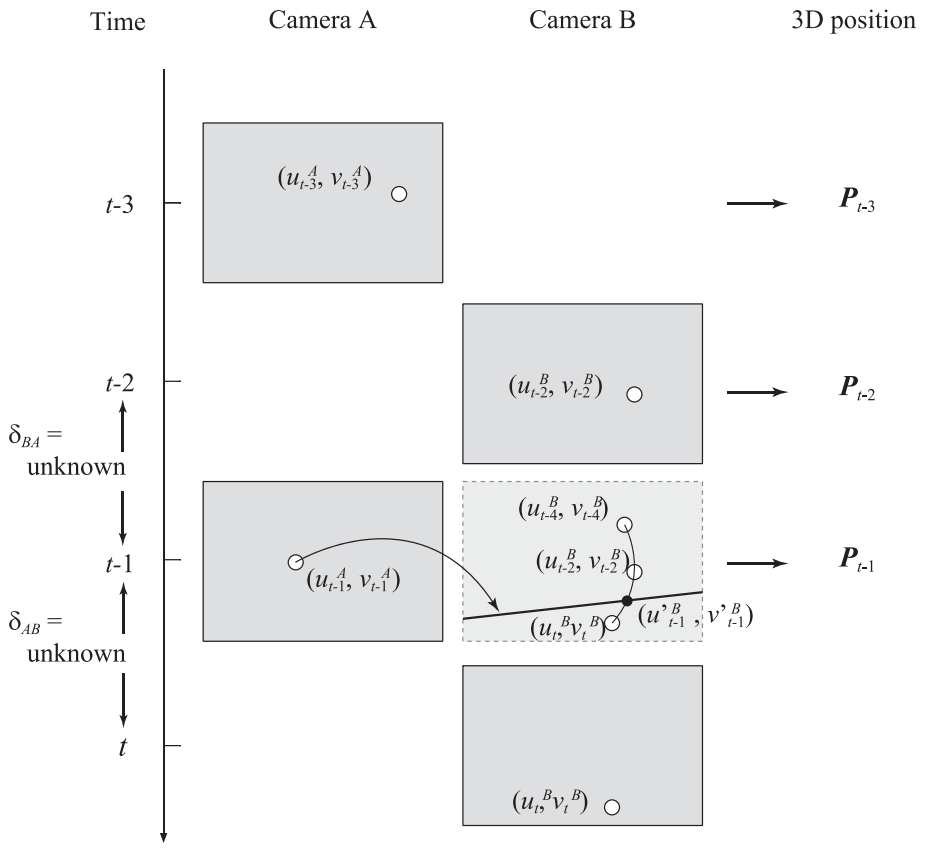


図 3.5: スプライン曲線による 3 次元位置推定

s は座標 (u, v) によって，一意に決まるパラメータであり，$u = u(s)$，$v = v(s)$ は s によって求まる関数となる．また，$B_{i,K}$ は $(K-1)$ 次の B スプラインであり，α，β は何点かの入力 (u, v) から推定でき，この定数を用いることによりスプライン曲線が求められる．

Step2 カメラキャリブレーションから得られる画像のエピポーラ幾何を利用して時刻 $t-1$ におけるカメラ A の観測された画像座標 (u^A_{t-1}, v^A_{t-1}) から対応するカメラ B 上のエピポーラ線を求める．

Step3 図 3.7 のように，Step1 で求めたスプライン曲線とエピポーラ線の交わる点を算出し，それを実際に観測したカメラ A の画像上の点 (u^A_{t-1}, v^A_{t-1}) の擬似的な対応点とする．この擬似対応点と実際に観測したカメラ A の画像上の点より，ステレオ視を用いて 3 次元位置 $\boldsymbol{P}_{t-1}$ を求める．

以上の処理を行うことで 1 フレーム前の 3 次元位置 $\boldsymbol{P}_{t-1}$ を出力することが可能となる．時刻 $t-2$ においても同様の処理を行うことで 2 フレーム前の 3 次元位置 $\boldsymbol{P}_{t-2}$ を得ることができる．これにより，2 台の非同期カメラを用いて対象物の最新フレームにおける 3 次元位置を求めることが可能となる．

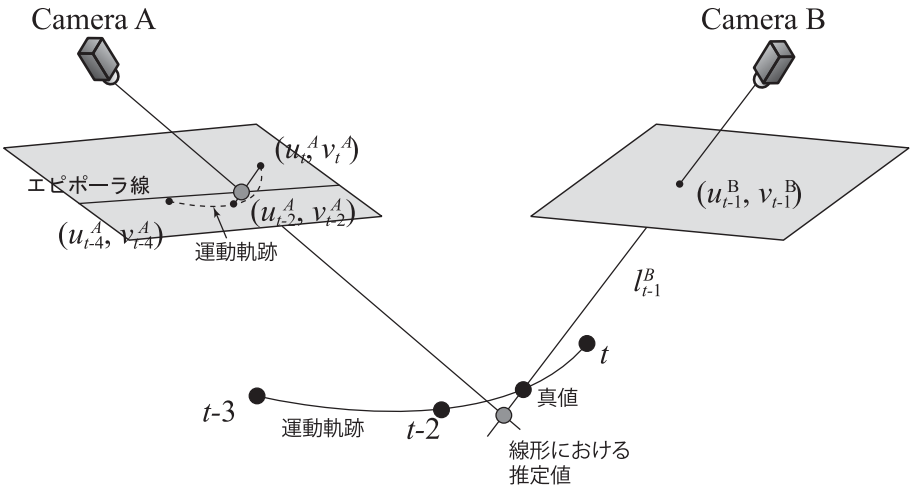


図 3.6: 線形とエピポーラ線の交点を擬似対応点とした際の 3 次元位置

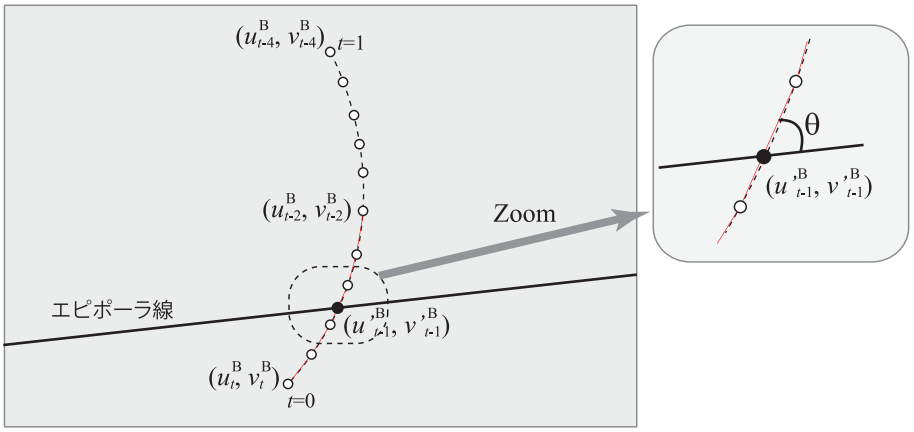


図 3.7: スプライン曲線とエピポーラ線の交点算出

3.3.2 推定位置の信頼性

本手法では，スプライン曲線とエピポーラ線の交点を擬似対応点として 3 次元位置を推定する．エピポーラ線は，予めカメラ間の対応点を算出し基礎行列 $\boldsymbol{F}$ を求めることにより算出できる．求めた基礎行列は，対応点間を最適にするように算出されるため，対応点以外の点では，誤差を含む．そのため，スプライン曲線とエピポーラ線が平行に近い場合，図 3.8 に示すように垂直に交わる場合に比べ，エピポーラ線により誤差が多く発生し，過去フレームの 3 次元位置精度が低下する．過去フレームにおける 3 次元位置推定精度を測るために，スプライン曲線とエピポーラ線の交点の角度 θ を信頼度とすることができる．

2 直線がそれぞれ $a_0x + b_0y + c$，$a_1x + b_1y + c$ で表せるとすると，2 直線のなす角は，

$$\cos\theta = \frac{|a_0a_1 + b_0b_1|}{\sqrt{a_0a_0 + b_0b_0}\sqrt{a_1a_1 + b_1b_1}} \tag{3.8}$$

として計算できる．この角度が 0 に近づくほどスプライン曲線とエピポーラ線が平行に近づくことを意味し，信頼度が低下する．信頼度の低い 3 次元位置は除去または 1 フレーム前の推定結果を使用するなどの対処を行う．

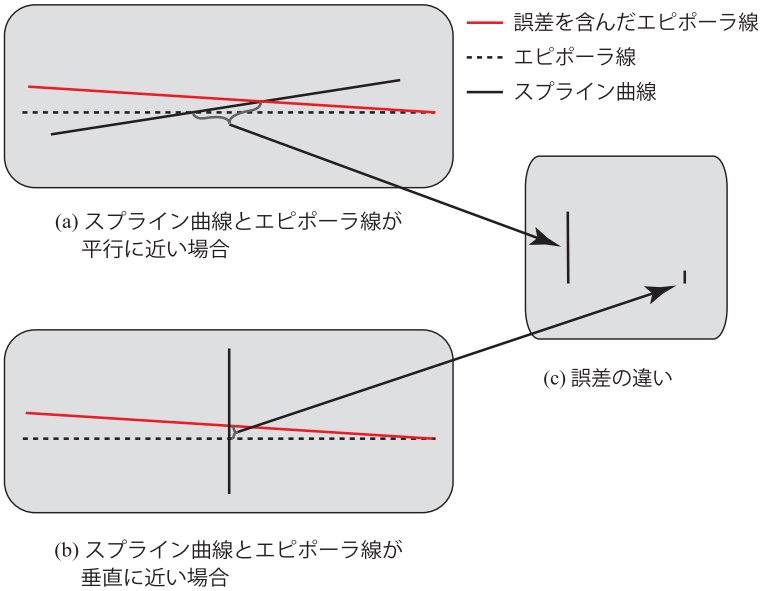


図 3.8: スプライン曲線とエピポーラ線の交点の誤差

3.4 多眼カメラへの拡張

本提案手法は，一台のカメラの画像上に対象物の軌跡を補間し，その軌跡と他のカメラから得られるエピポーラ線の交点を対応点としてステレオ視で過去フレームの 3 次元位置を算出する．図 3.9 に 3 台へ拡張した例を示す.

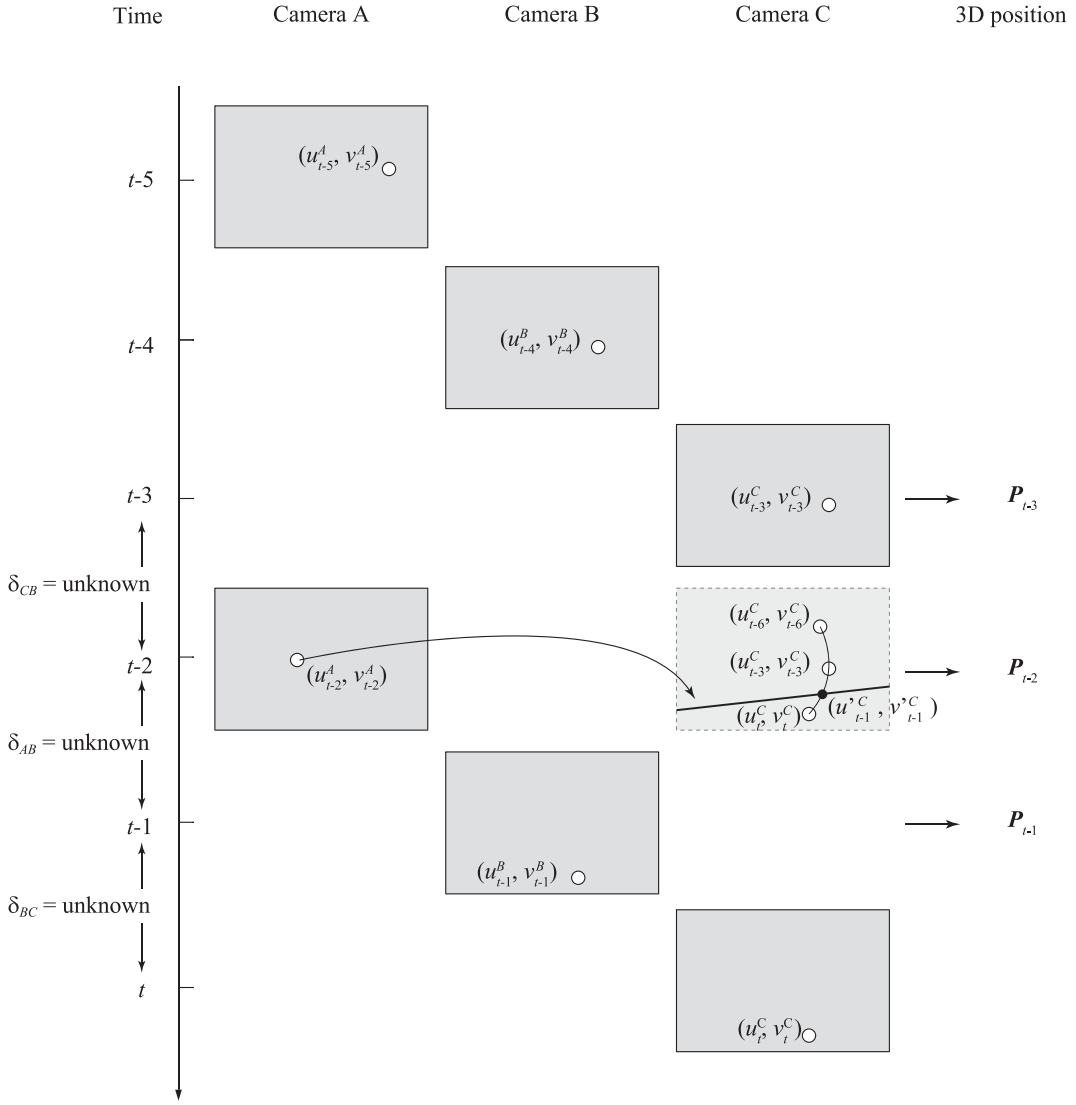


図 3.9: 3 台の多眼カメラへ拡張

N 台の多眼カメラへの拡張では，スプライン曲線とエピポーラ線の交点の算出を増やすことで，容易に拡張することができる．以下にアルゴリズムを示す.

N 台の多眼カメラへの拡張

$C_{i,t}, C_{i,t-1}, C_{i,t-2} \cdots C_{i,t-i}$ (i = 0, 1, 2 $\cdots NN$:カメラの台数)

1 最新フレーム t の画像を取得

2 対象物の運動軌跡を最新フレームのカメラの画像上で補間

3 過去 3 フレームの 3 次元位置を推定

for i = 1:3

3.1 時刻 $t-i$ における各カメラからエピポーラ線を引く
3.2 エピポーラ線とスプライン曲線の交点を算出
3.3 交点と実際に観測した点で 3 次元位置推定

end for

4 過去 3 フレームの 3 次元位置を用いて最新フレームにおける対象物の 3 次元位置を予測

5 光線の拘束を用いて最新フレームの 3 次元位置を決定

提案手法では，多眼カメラへの拡張が容易であり，N 台のカメラを用いた場合，1 秒間に N×30 ポイントの 3 次元位置を出力することができる．そのため，高速なビジュアルフィードバックによる制御が可能となる．

3.5 評価実験

提案手法では，3 次元空間中の対象物の運動を復元するシミュレーション実験と，実カメラを用いた実験により提案手法の評価を行う．

3.5.1 シミュレーション実験

■ 実験概要

対象物が仮想世界座標空間 (3,000 × 2,000 × 2,000 mm) を移動していると仮定し，その運動復元を行う．3 台のカメラは，高さ 3,000 mm に平行となるように設置してあるとする (図 3.10 参照)．このとき，3 次元空間中の対象物の運動として，以下に示す 2 種類の等速・非等速運動を対象とする．

- 等速運動 (螺旋): (x, y) = (1,500, 1,000) を中心に半径 500 mm，角速度 3.9 rad/s で螺旋上を移動
- 非等速運動: 高さ 1000 mm の位置からボールを落下させたときの放物運動 (重力加速度 g=9.8 m/s^2)

これらの対象物の運動軌跡をカメラ間の時間ずれ毎に， 各カメラの仮想画像平面へ投影することにより，入力データを取得する．カメラは 2 台と 3 台用いるとし，提案手法の精度評価を行う．以下に各手法におけるカメラの定義を示す．

- スプライン曲線: 各カメラが非同期固定カメラ
- 線形: スプライン曲線と同じ条件
- ステレオ視: 各カメラが同期固定カメラ

2 台のときのカメラ A とカメラ B の等間隔の時間ずれは 1/60 秒，非等間隔の時間ずれは 1/60 秒 ～ 1/30 秒の間でそれぞれのタイミングでランダムとする．また，3 台のときの各カメラ間の等間隔の時間ずれは 1/90 秒，非等間隔の時間ずれは 1/90 秒 ～ 1/30 秒の間でそれぞれのタイミングでランダムとする．これらのタイミング毎に得られた各カメラの仮想画像平面上の点 (u, v) を用いて，提案手法により 3 次元位置を推定する．また，本実験において画像平面上での観測誤差はないとする．

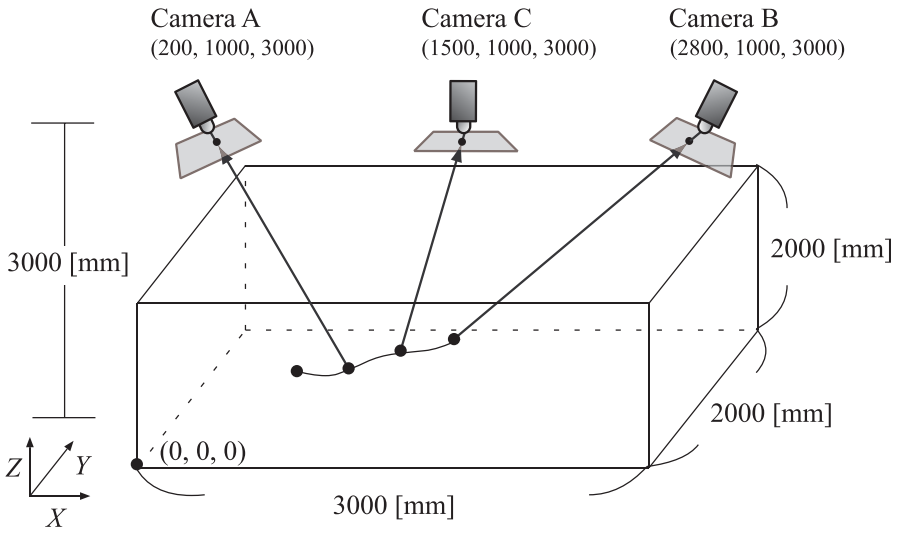


図 3.10: 仮想カメラの配置 (3 台)

■ 実験結果

提案手法では，前フレームの 3 次元位置を用いて最新フレームの 3 次元位置を推定するため，最新フレームの 3 次元位置は，前フレームの 3 次元位置の精度に影響する．そのため，1 フレーム前の 3 次元位置の評価を行う．表 3.1 に推定値と真値との平均誤差を示す．線形と比較すると，螺旋運動では提案手法の方が良い精度で推定出来ていることがわかる．これは，線形では螺旋運動の運動軌跡を正確に補間することが困難なことからもわかる．一方，非等速運動は，ボールを落下させた時の放物運動となり，線形でも運動軌跡を十分に精度よく補間できるため，提案手法と同精度で 3 次元位置を推定することができている．

提案手法では，螺旋運動の非等間隔以外のシーンにおいて 1 mm 以下の誤差で推定できていることが分かる．したがって，提案手法は，データの取得間隔に依存せずに 3 次元位置を推定可能であ

表 3.1: 3 次元位置と真値の平均誤差 (1 フレーム前) [mm]

		螺旋		非等速	
カメラの台数		2	3	2	3
スプライン曲線	一定	0.03	0.06	0.47	0.36
	ランダム	1.31	0.14	0.43	0.42
線形	一定	1.75	2.00	0.64	0.47
	ランダム	1.69	1.93	0.56	0.57

表 3.2: 3 次元位置と真値の平均誤差 (最新フレーム) [mm]

		螺旋		非等速	
カメラの台数		2	3	2	3
スプライン曲線	一定	0.09	0.16	1.37	1.15
	ランダム	5.78	0.71	1.31	2.43
線形	一定	7.90	4.58	1.08	1.46
	ランダム	6.01	2.18	1.15	2.57
ステレオ視	一定	0.16	0.17	1.63	1.79
	ランダム	0.25	0.26	2.57	2.65

るといえる．螺旋運動で精度が悪くなる原因は，スプライン曲線とエピポーラ線が平行に近い際に，3 次元位置推定精度が下がるためである．これは，図 3.11 に示す交点角 θ と誤差の関係からも分かる．そのため，**3.3.2** で述べたように，交点角 θ を 3 次元位置推定精度の信頼度として使用することができる．

次に，表 3.2 に最新フレームの 3 次元位置の推定値と真値との平均誤差を示す．表 3.2 のステレオ視は，同期した対応する点を用いてステレオ視で 3 次元位置を算出し，最新フレームの位置を推定した際の誤差である．線形と比較すると，1 フレーム前と同様に螺旋運動で提案手法の有効性が示されていることが分かる．ステレオ視の最新フレームの推定誤差と比較すると，提案手法の螺旋運動における精度は低い．これは，前フレームの精度が悪いため，前フレームの 3 次元位置を用いて最新フレームを推定しているため，3 次元位置推定精度が下がる．それに対し，非等速運動の精度が高い結果を得た．これは，提案手法における最新フレームの 3 次元位置推定が，最新フレームの光線を利用しているため，バウンド時の推定精度が向上しているためであると考えられる．

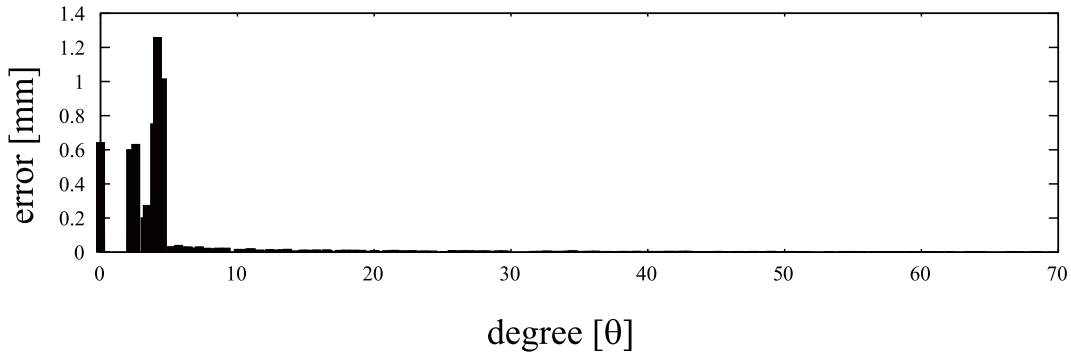


図 3.11: 誤差と交点角 θ の関係

3.5.2 実際のカメラを用いた実験

■ 実験概要

実際にカメラを用いて等速円運動する対象物の 3 次元位置を推定する実験を行う．図 3.12 のように半径 160 mm のターンテーブルに対象物 (ボール) を乗せることにより等速円運動を発生させる．このとき，各手法で使用するカメラは以下のように設置した．

- スプライン曲線: 2 台の非同期固定カメラを使用し，カメラの内部 · 外部パラメータと基礎行列 $\boldsymbol{F}$ は算出済み
- 線形: スプライン曲線と同じ条件
- ステレオ視: 2 台の同期固定カメラ

これらのカメラを用いて，スプライン曲線による 3 次元位置推定とスプライン曲面による 3 次元位置推定により，最新フレームの 3 次元位置を求める．比較対象はシミュレーション実験と同様に，非同期の対応点を用いたステレオ視とする．

■ 実験結果

図 3.13 に各手法で最新フレームの 3 次元位置を推定した結果を示す．図 3.13(b) は同期した対応点を用いてステレオ視で 3 次元位置を算出し，1/60 秒後の 3 次元位置を 2 次曲線で推定した結果である．また，表 3.3 に最新フレームと 1 フレーム前の推定結果における円の半径の平均誤差と標準偏差を示す．表 3.3 のステレオ視は，同期した対応点を用いてステレオ視で 3 次元位置を算出し，1/60 秒後の 3 次元位置を 2 次曲線で推定した結果であり，ステレオ視における 1 フレーム前の 3 次元位置は，同期した対応点を用いてステレオ視で 3 次元位置を算出したものである．

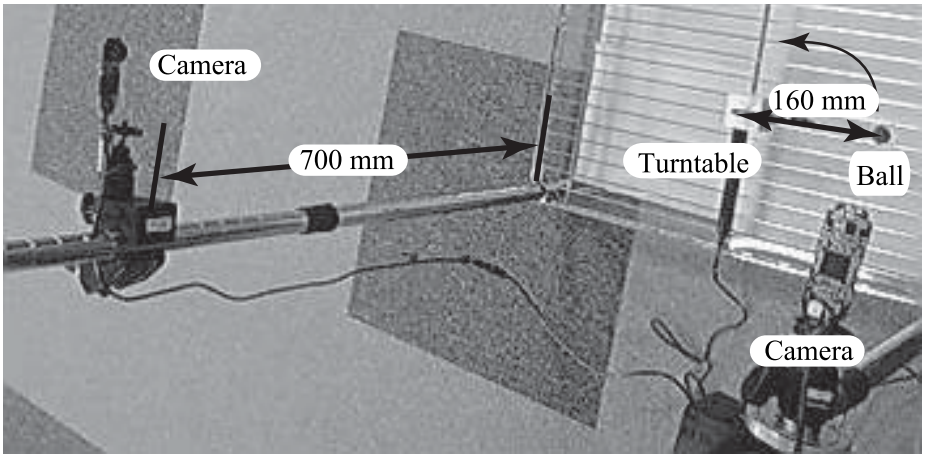


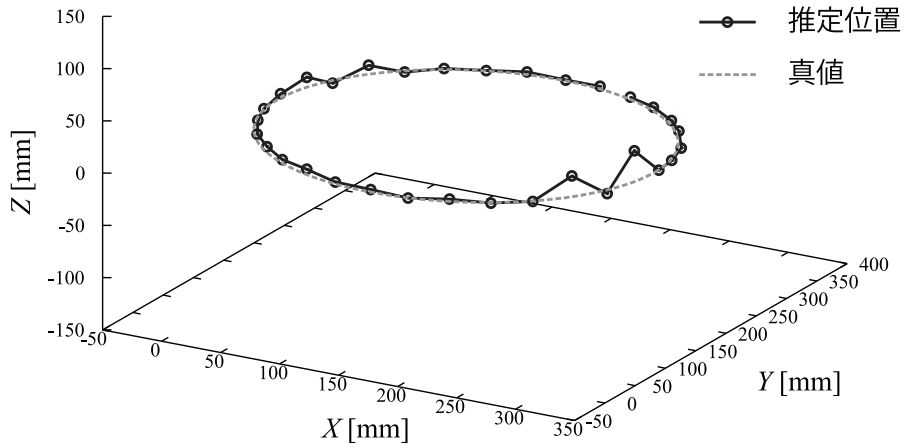
図 3.12: カメラの配置とターンテーブル

表 3.3: 真値との誤差と標準偏差 [mm]

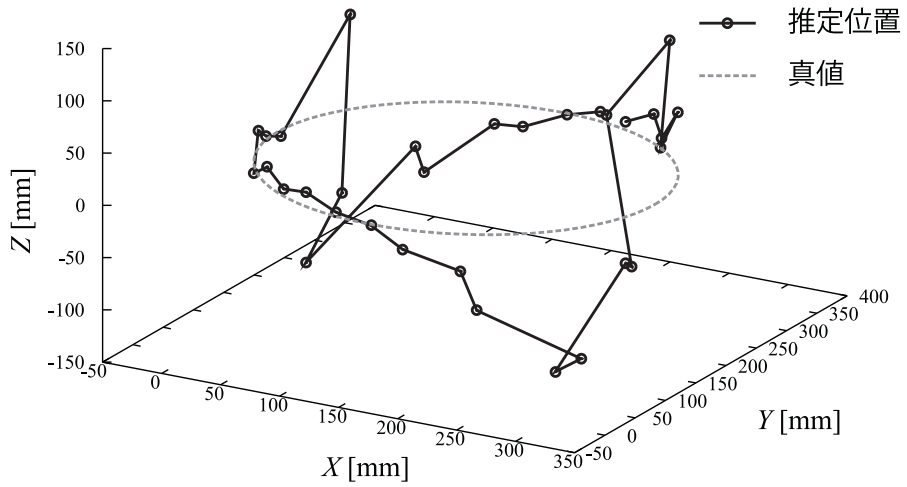
手法	平均誤差		標準偏差	
	最新フレーム	1 フレーム前	最新フレーム	1 フレーム前
スプライン曲線	1.24	0.72	1.58	0.57
線形	9.74	24.75	12.94	35.33
ステレオ視	0.99	0.46	0.80	0.28

表 3.3 で，スプライン曲線と線形の精度を比較すると，スプライン曲線の方が高精度に 3 次元位置を推定出来ていることがわかる．また，線形では，1 フレーム前に比べ，最新フレームの方が精度が高い．これは，最新フレームを算出する際に，過去 3 フレームの 3 次元位置を 2 次関数に当てはめることや，光線の拘束により精度が向上したためであると考えられる．

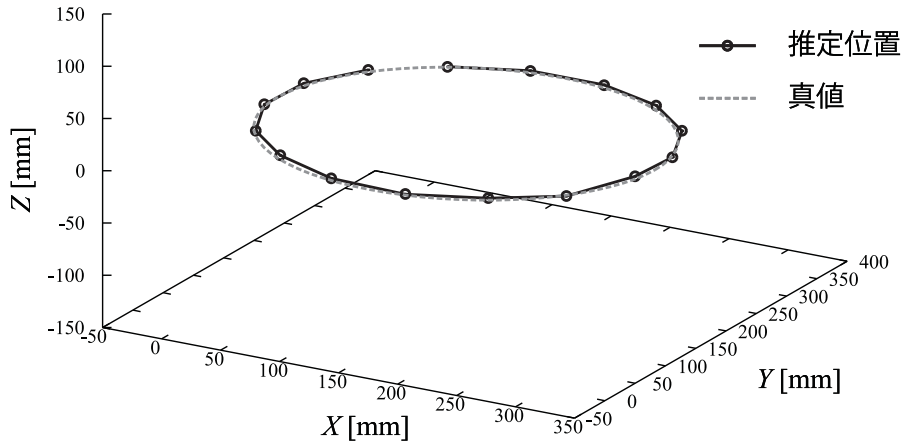
次に，スプライン曲線とステレオ視を比較すると，1 フレーム前の半径の平均誤差では，通常のステレオ視と同等の精度で算出できていることがわかる．また，最新フレームの差は 0.3 mm と小さく，有意な差があるとは言えない．したがって，提案手法はステレオ視と同精度で 3 次元位置を推定できると考えられる．



(a) スプライン曲線



(b) 線形



(c) ステレオ視

図 3.13: 3 次元位置推定結果

3.5.3　多眼非同期カメラによるボールの 3 次元位置推定実験

■ **実験概要**

バウンドするボールの 3 次元位置推定実験を行うため，図 3.14 に示す領域にカメラを設置する．3 台の通常カメラ (フレームレートは 30 fps) を用いたビジョンシステムの概略を図 3.14 に示す．カメラは高さ 2,800 mm の位置に床面上の 2,500 × 3,000 mm の領域が視野に入るように設置した．それぞれのカメラは，キャリブレーション済みである．カメラからの映像信号は，1 台の PC にインストールされた 3 枚のフレームグラバに入力され，それぞれの画像が取り込まれる．以下に，実際に使用した機器を示す．

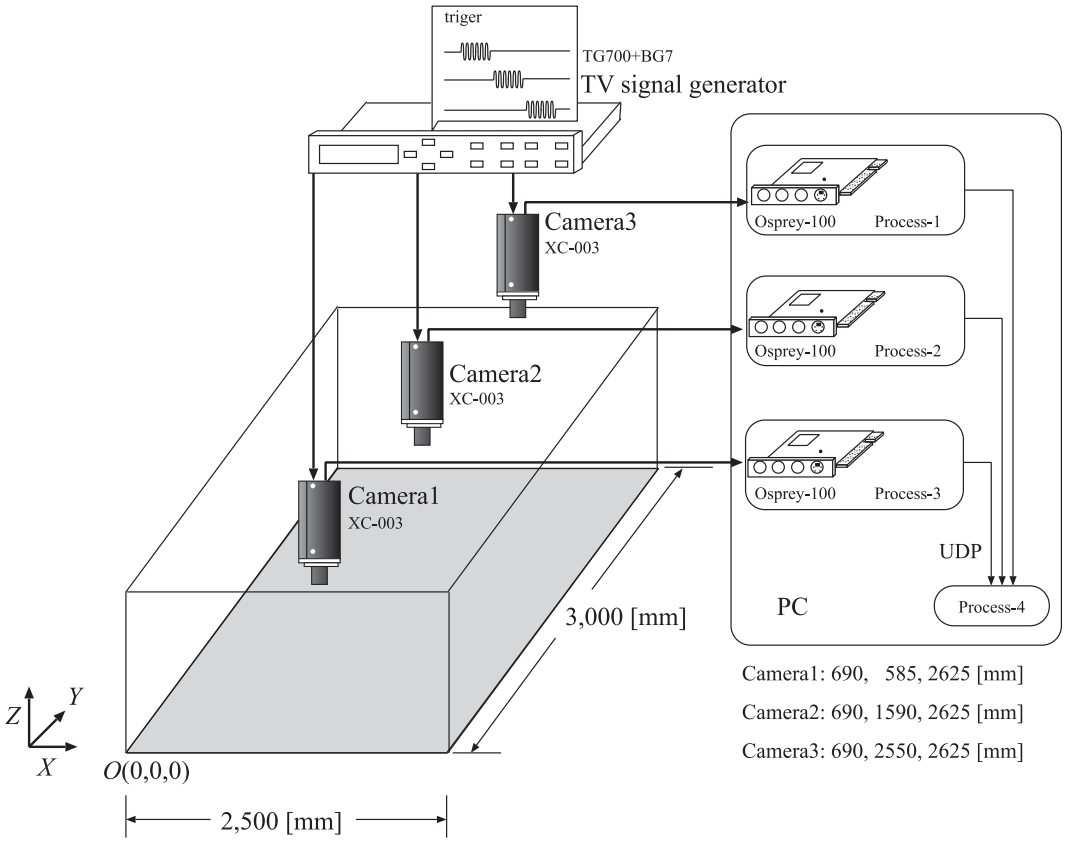


図 3.14: ビジョンシステムの概略

< 構成機器 >

- PC (DELL PRECISION 530)
  - CPU (XEON DUAL PROCESSOR 2.2GHz)
  - MEMORY (1.0 GB)
- CAMERA (SONY XC-003) × 3
- キャプチャボード (Osprey-100) × 3
- 画像入力用ケーブル × 3
- 同期信号発生装置 TG700+BG7

■ ボールの 3 次元位置推定実験

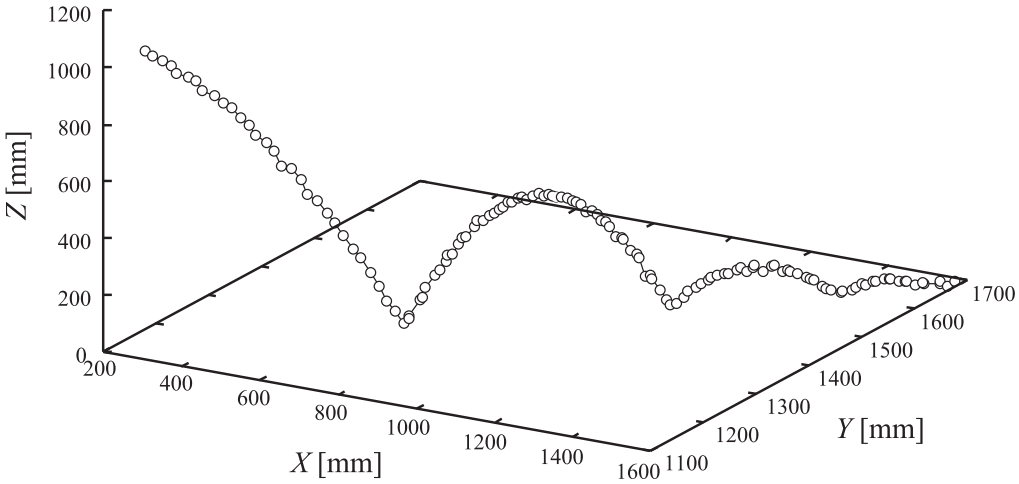
本実験では，図 3.1(b) に示すカメラのシャッタータイミングの時間ずれを実現するために，TV 信号発生装置を用いて，各カメラに 1/90 秒ずらした NTSC 信号を同期信号として入力する．カメラ i における (u^i, v^i) 対象物の画像座標は，単一色で構成されるボールであるため特定色領域を検出し，その重心とした．そのため，画像上の観測誤差が求めた 3 次元位置に含まれることになる．

実際にボールを投げたときの 1.5 秒間におけるボール軌道の復元結果を図 3.15 に示す．図 3.15(a) の提案手法では，135 ポイントのボールの 3 次元位置が存在しており，3 台の通常のカメラで 1 秒間に 90 ポイントの 3 次元位置を得ていることがわかる．一方，同図 (b) では，同期したカメラを用いるため，3 次元位置の出力は 45 ポイントとなる．

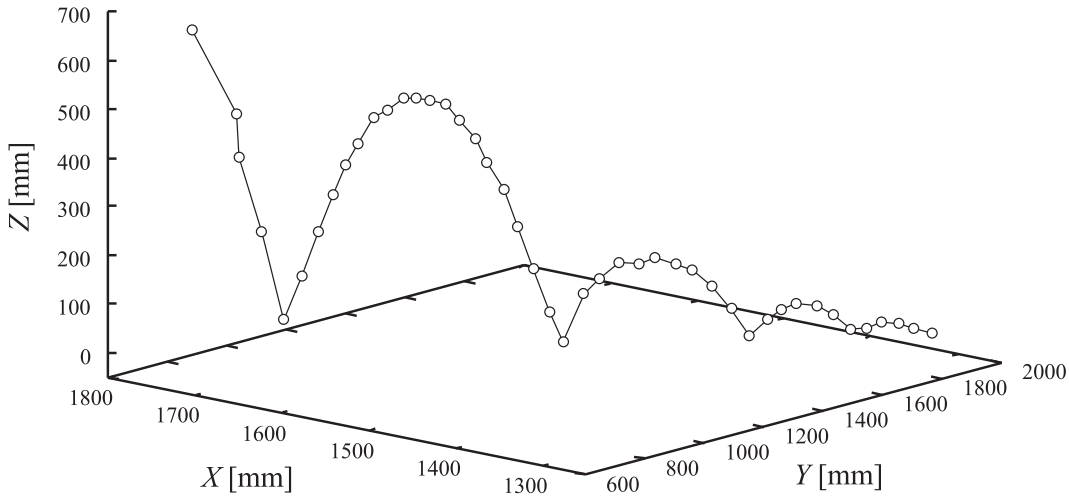
以上より提案手法はカメラのシャッタータイミング毎に 3 次元位置を出力することが可能である．

3.5.4 処理時間

ボールの 3 次元位置推定に用いた多眼非同期カメラシステム (CPU Xeon 2GHz(x2)，メモリ 2GB) の PC を使用して，処理時間の計測を行う．計測した結果，提案手法の 1 フレームにかかる処理時間は，約 0.5 ms となった．30 fps のカメラを n 台使用する場合にリアルタイム処理が可能であるかどうかは，$0.5\text{ms} < 1/(n{*}30)\text{ms}$ で判定することができる．例えば，3 台使用する場合は，$0.5\text{ms} < 1/(90) = 11\text{ms}$ であり条件を満たすため，リアルタイム処理が可能である．



(a) スプライン曲線



(b) ステレオ視

図 3.15: ボールの運動復元結果

3.6 まとめ

本章では，多眼非同期カメラを用いた 3 次元位置推定法を提案した．非同期のカメラを使用してステレオ視により 3 次元位置を推定することは，時間ずれを含む対応点を使うことから，正確な位置推定が不可能である．提案手法では，ステレオ視で用いる対応点を対象物の運動軌跡をスプライン曲線によって補間することにより推定し，3 次元位置を推定する．シミュレーション実験と実際のカメラを用いた実験により，提案手法の評価を行った．シミュレーション実験では，提案手法とステレオ視が同等の精度であることを示した．円運動を復元する実験において，提案手法の半径の平均誤差は 1.24 mm であり，ステレオ視の半径の平均誤差は 0.99 mm であることから，シミュレーション実験と同様に，提案手法とステレオ視は同等の精度で 3 次元位置を推定できることを確認した．また，バウンドしているボールの 3 次元位置を推定することができることも確認した．

提案手法は，多眼カメラへの拡張が容易であり，1 フレームの処理時間が約 0.5ms と処理速度の面でも多眼カメラへ展開が可能である．さらに，多眼にすることで，1 秒間にカメラの台数 ×30 ポイントの 3 次元位置を出力することが可能である．したがって，提案手法は，高速なビジュアルフィードバックによるロボット制御への応用が期待できる．

第4章

多眼非同期パン·チルトカメラによる高速3次元位置推定

3 章では，固定非同期カメラによる 3 次元位置推定法について提案した．この手法は，画像上に対象物の軌跡を推定し，その軌跡とエピポーラ線の交点を擬似的なステレオ視の対応点とする手法である．しかし，カメラがパン · チルトした場合，対象物の軌跡を同一の画像平面で捉えることが不可能であるため，3 次元位置の推定は不可能となる．そこで本章では，対象物の軌跡を 3 次元空間中に拡張することにより，非同期パン · チルトカメラによる 3 次元位置推定法を提案する．

4.1 において，最新フレームの 3 次元位置の推定法について述べ，**4.2** では，過去フレームの 3 次元位置推定法について述べる．**4.3** では，多眼カメラへの拡張について述べる．**4.4** では，評価実験を行うことにより，提案手法の有効性を示す．

4.1 最新フレームの3次元位置推定

最新フレームの3次元位置推定は，過去フレームの3次元位置から推定する．この手法で必要な情報は，過去フレームの3次元位置であるため，パン·チルト非同期カメラにおいても **3.2** で述べた手法を用いて最新フレーム3次元位置を推定する．

最新フレーム t の3次元位置は光線 l^B_{ray} 上に存在するため，2次関数により予測した最新フレームの3次元位置 $\boldsymbol{P}'_t$ から最も近い光線上の点を最新フレームの3次元位置 $\boldsymbol{P}_t$ とする．

$$\boldsymbol{P}_t = \frac{(\boldsymbol{P'}_t - \boldsymbol{T}^B) \cdot \boldsymbol{r}^B}{|\boldsymbol{r}^B|^2}\boldsymbol{r}^B + \boldsymbol{T}^B \tag{4.1}$$

4.2 パン·チルト非同期カメラにおける過去フレームの3次元位置推定

3 章では，固定非同期カメラから取得した画像から，対象物の軌跡をスプライン曲線で補間し，スプライン曲線とエピポーラ線との交点を擬似対応点とすることにより3次元位置の推定を行った．パン·チルト非同期カメラでは，カメラが可動するため，対象物の運動軌跡を一定の画像平面上にとらえることができない．したがって，画像面でのスプライン曲線による運動軌跡の補間が不可能となり，エピポーラ線との交点を擬似対応点とする手法を用いることができない．そこで，対象物の運動を補間する考えを3次元空間に拡張することにより，3次元位置の推定を行う．カメラの回転行列と平行移動ベクトルを用いることにより3次元空間中に曲面を作成し，その曲面と光線の交点を求めることにより3次元位置を算出する (図 4.1 参照).

4.2.1 2次のスプライン曲面による3次元位置推定

提案手法では，対象物の軌跡を推定し，その軌跡と存在しないフレームのエピポーラ線との交点を求めることで擬似対応点を取得する．そのため，3次元位置の精度は運動軌跡に依存する．運動軌跡を平面であるととらえると，実際の運動が平面で表現できない場合，図 4.2 に示すような誤差が発生する．そのため本手法では，スプライン曲面により運動軌跡を捉える．以下にスプライン曲面による3次元位置推定法を述べる．

Step1 各フレームにおいて対象物の画像座標とカメラの姿勢から3次元空間中に光線を求める．光線は，各時刻におけるカメラ i の位置 $\boldsymbol{T}^i$=$[T_x\ T_y\ T_z]^T$ とカメラ向きの回転行列 $\boldsymbol{R}_t$ から，式 (4.2) に示すように直線 $\boldsymbol{l}^i_t$ と表現できる．

$$\boldsymbol{l}^i_t = k\boldsymbol{R}_t\boldsymbol{r}^i_t + \boldsymbol{T}^i \tag{4.2}$$

カメラ位置 $\boldsymbol{T}^i$ はあらかじめキャリブレーションにより算出してあるため既知とし，回転行列

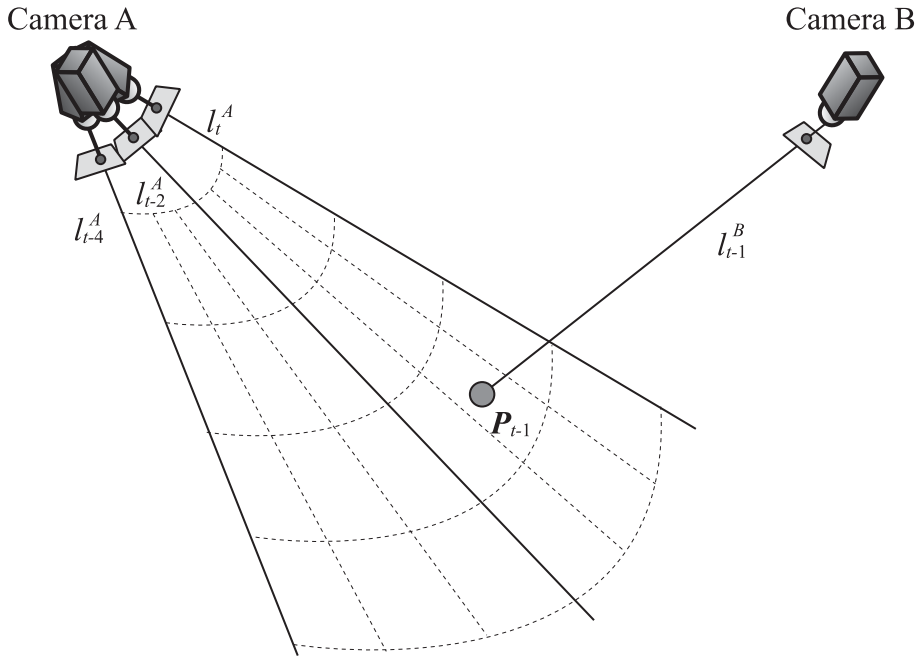


図 4.1: B スプラインによる曲面推定

$\boldsymbol{R}_t$ はカメラから取得できるとする．k は実数であり，$\boldsymbol{r}_t^i$=$[x_c\ y_c\ f]^T$ は画像平面上の観測点 (u, v) を通る光線の傾きを表すベクトルである．

Step2 各フレーム t，$t-2$，$t-4$ における直線 $\boldsymbol{l}_t^A$，$\boldsymbol{l}_{t-2}^A$，$\boldsymbol{l}_{t-4}^A$ に実数 k を代入し，各光線上に 5 点づつ計 15 点の 3 次元位置を求める．求めた 15 点のデータを入力値とし，B-スプラインを用いて以下の式より曲面を求める．

$$x(s,t) = \sum_{i=0}^{I-1}\sum_{j=0}^{J-1} \alpha_{ij} B_{i,K}(s) B_{j,L}(t) \tag{4.3}$$

$$y(s,t) = \sum_{i=0}^{I-1}\sum_{j=0}^{J-1} \beta_{ij} B_{i,K}(s) B_{j,L}(t) \tag{4.4}$$

$$z(s,t) = \sum_{i=0}^{I-1}\sum_{j=0}^{J-1} \gamma_{ij} B_{i,K}(s) B_{j,L}(t) \tag{4.5}$$

$x = x(s,t)$，$y = y(s,t)$，$z = z(s,t)$ は s と t によって求まる関数である．また，$B_{i,K}$，$B_{j,L}$ は $(K-1)$ 次と $(L-1)$ 次の B スプラインであり，α，β，γ は数点の入力 (x, y, z) から導かれ，この定数を用いることによりスプライン曲面が求められる．

Step3 時刻 $t-1$ のカメラ A からの光線 $\boldsymbol{l}_{t-1}^B$ と曲面が交わる点を求め，その点を 3 次元位置とする (詳しくは 4.2.2 で述べる)．

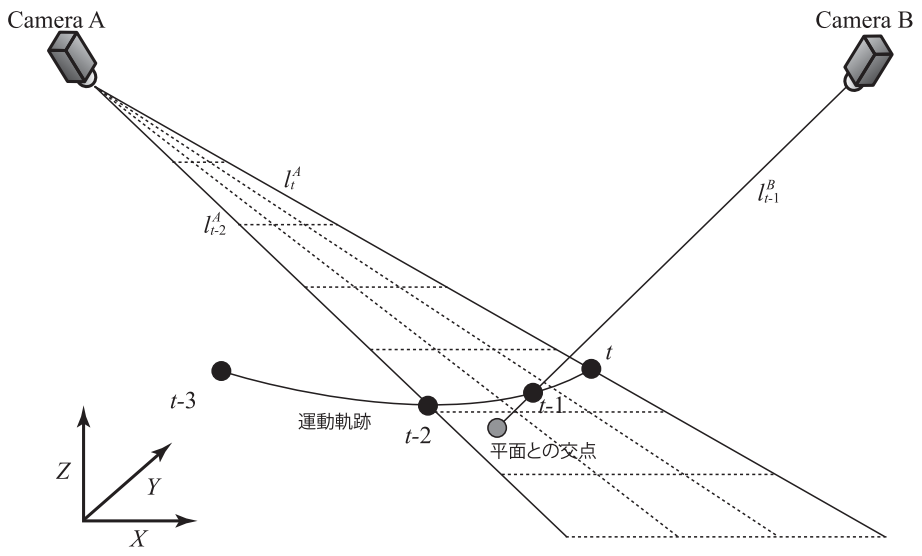


図 4.2: 平面と光線の交点

以上の処理を時刻 $t-2$ と $t-3$ においても行うことで，$t-1$，$t-2$，$t-3$ における 3 次元位置 $\boldsymbol{P}_{t-1}$，$\boldsymbol{P}_{t-2}$，$\boldsymbol{P}_{t-3}$ が求まる．

4.2.2 直線と曲面の交点の探索

3 次元位置 $\boldsymbol{P}_{t-1}$ は，時刻 $t-1$ のカメラ B の画像座標 (u_{t-1}^B, v_{t-1}^B) から得られる直線が曲面と交わる点 $\boldsymbol{P}_{t-1}$ として求める．しかし，曲面は B-スプラインにより求められているため，直接交点を求めることは容易ではない．そこで本手法では，曲面を細分化し平面の集合体として処理することにより，交点を求める．以下にその手順を示す．

1. 対象物の運動軌跡である光線群から求めた曲面において，時刻 $t-1$ における対象物体は，時刻 t から $t-2$ までの範囲内に存在するため図 4.3 に示す頂点 A，B，C，D とした曲面領域を初期探索範囲とする．
2. 曲面上の頂点 A，B，C，D により囲まれた領域に対して，媒介変数 s, t を制御して，曲面上の中点 (AB，BC，CD，DA) を求め，4 分割する (4.3(c) 参照)．
3. 4 分割された各平面において，平面区間内にカメラ B から得られる光線 $\boldsymbol{l}_{t-1}^B$ との交点 $\boldsymbol{P}$ が存在するか判定を行う．このとき，各平面の頂点から 3 頂点を選び，図 4.3(d) に示すように 2 つの三角形が存在する平面を求める．その平面とカメラからの直線が交差する点を求め，その点が三角形内に存在するか内外判定を行う (図 4.3(d) 参照)．
4. 内外判定の結果，内側と判定された平面領域を初期領域として，(2)，(3) を繰り返す．最終的に，分割された平面の頂点と交点 $\boldsymbol{P}$ との距離 d がしきい値以下であれば，繰り返し処理を終了する．

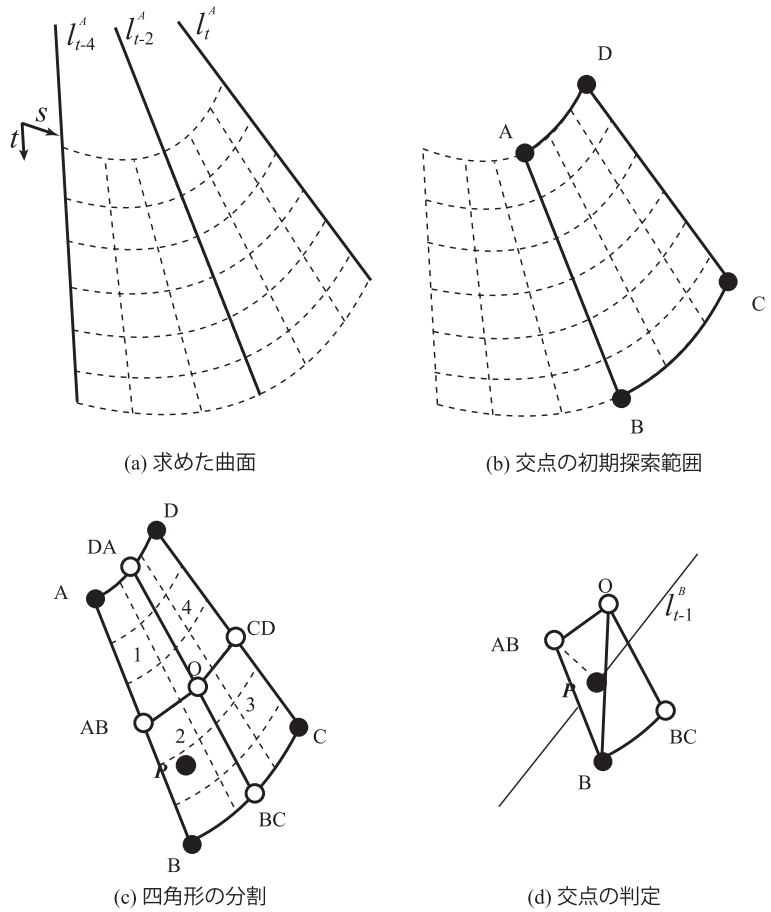


図 4.3: 直線と曲面の交点計算

あらかじめ任意の距離しきい値を設定することで，必要となる精度に対応した 3 次元位置を求めることが可能である．

4.2.3 推定位置の信頼性

スプライン曲面と光線が平行に近い場合，図 4.4 に示すように過去フレームの 3 次元位置精度が悪くなる．そのため，過去フレームの 3 次元位置の信頼性を求める必要がある．平行に近いということは，その交点角が鋭角になるということである．そこで，交点の角度 θ を信頼度として， 信頼度の低い 3 次元位置を除去または 1 フレーム前の推定結果を使用する．光線の式 $(x-T_x)/\lambda = (y-T_y)/\mu = (z-T_z)/\nu$ と平面 $ax+by+cz+d=0$ のなす角は，

$$\sin\theta = \pm\frac{\lambda a + \mu b + \nu c}{\sqrt{\lambda^2+\mu^2+\nu^2}\sqrt{a^2+b^2+c^2}} \tag{4.6}$$

として計算できる．信頼度の低い 3 次元位置は除去または 1 フレーム前の推定結果を使用するなどの対処を行う．

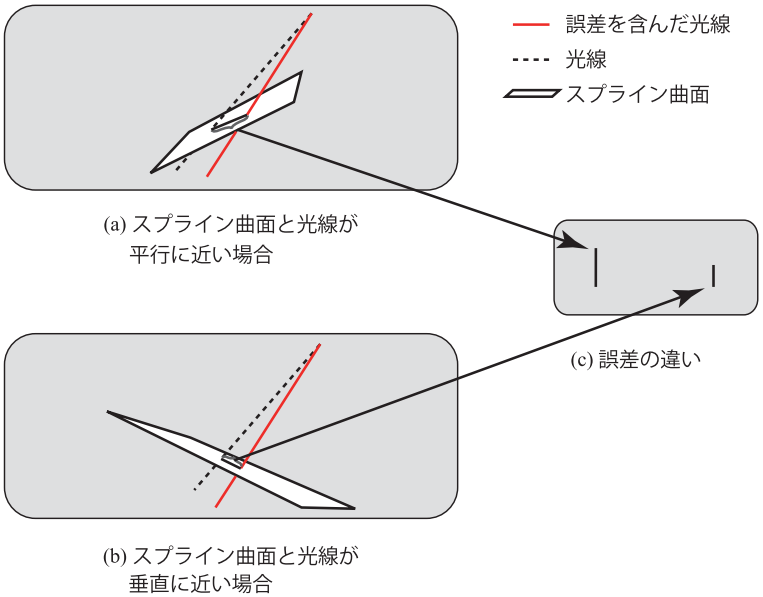


図 4.4: スプライン曲面と光線の交点の誤差

4.3 多眼カメラへの拡張

本章の手法も **3** 章と同様に，多眼カメラへの拡張が可能である．提案手法は，3 次元空間中に対象物の軌跡を曲面として補間し，その軌跡と他のカメラから得られる光線の交点を過去フレームの 3 次元位置とする．図 4.5 に 3 台へ拡張した例を示す．

N 台の多眼カメラへの拡張では，スプライン曲面と光線の交点の算出を増やすことで，容易に拡張することができる．以下にアルゴリズムを示す．

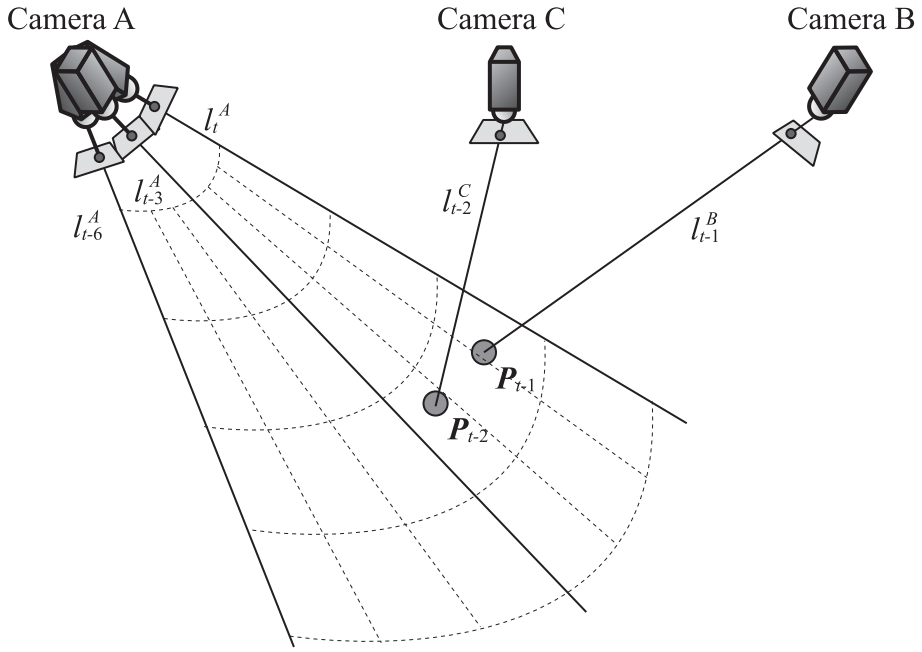


図 4.5: 3 台の多眼カメラへ拡張

N 台の多眼カメラへの拡張

$C_{i,t}, C_{i,t-1}, C_{i,t-2} \cdots C_{i,t-i}$ (i = 0, 1, 2 $\cdots NN$:カメラの台数)

1 最新フレーム t の画像を取得

2 対象物の運動軌跡を最新フレームのカメラの光線からスプライン曲面を用いて補間

3 過去 3 フレームの 3 次元位置を推定

for i = 1:3

3.1 時刻 $t-i$ における各カメラから 3 次元空間中に光線を引く

3.2 スプライン曲面と光線の交点を算出し，時刻 $t-i$ の 3 次元位置とする

end for

4 過去 3 フレームの 3 次元位置を用いて最新フレームにおける対象物の 3 次元位置を予測

5 光線の拘束を用いて最新フレームの 3 次元位置を決定

多眼カメラにすることで，1 秒間にカメラの台数 ×30 ポイントの 3 次元位置を出力することができる．

4.4 評価実験

スプライン曲面を用いた推定手法による 3 次元空間中の対象物の運動を復元するシミュレーション実験と，実カメラを用いた実験により評価を行う．

4.4.1 シミュレーション実験

本シミュレーション実験は，**3** 章と同様の環境において行う．その環境を以下に示す．対象物が仮想世界座標空間 (3,000 × 2,000 × 2,000 mm) を移動していると仮定し，その運動復元を行う．3 台のカメラは，高さ 3,000 mm に平行となるように設置してあるとする (図 4.6 参照)．このとき，3 次元空間中の対象物の運動として，以下に示す 2 種類の等速・非等速運動を対象とする．

- 等速運動 (螺旋): $(x, y) = (1{,}500, 1{,}000)$ を中心に半径 500 mm，角速度 3.9 rad/s で螺旋上を移動
- 非等速運動: 高さ 1000 mm の位置からボールを落下させたときの放物運動 (重力加速度 g=9.8 m/s^2)

これらの対象物の運動軌跡をカメラ間の時間ずれ毎に， 各カメラの仮想画像平面へ投影することにより，入力データを取得する．カメラは 2 台と 3 台用いるとし，提案手法の精度評価を行う．以下に各手法におけるカメラの定義を示す．

- スプライン曲面: 各カメラが非同期パン · チルトカメラ
- 平面: スプライン曲面と同じ条件
- ステレオ視: 各カメラが同期固定カメラ

2 台のときのカメラ A とカメラ B の等間隔の時間ずれは 1/60 秒，非等間隔の時間ずれは 1/60 秒 ∼ 1/30 秒の間でそれぞれのタイミングでランダムとする．また，3 台のときの各カメラ間の等間隔の時間ずれは 1/90 秒，非等間隔の時間ずれは 1/90 秒 ∼ 1/30 秒の間でそれぞれのタイミングでランダムとする．これらのタイミング毎に得られた各カメラの仮想画像平面上の点 (u, v) を用いて，提案手法により 3 次元位置を推定する．また，本実験において画像平面上での観測誤差はないとする．

4.4.2 実験結果

提案手法では，前フレームの 3 次元位置を用いて最新フレームの 3 次元位置を推定するため，最新フレームの 3 次元位置は，前フレームの 3 次元位置の精度に影響する．そのため，1 フレーム前の 3 次元位置の評価を行う．表 4.1 に推定値と真値との平均誤差を示す．平面と比較すると，螺旋運動では提案手法の方が良い精度で推定出来ていることがわかる．これは，螺旋運動の運動軌跡が平面

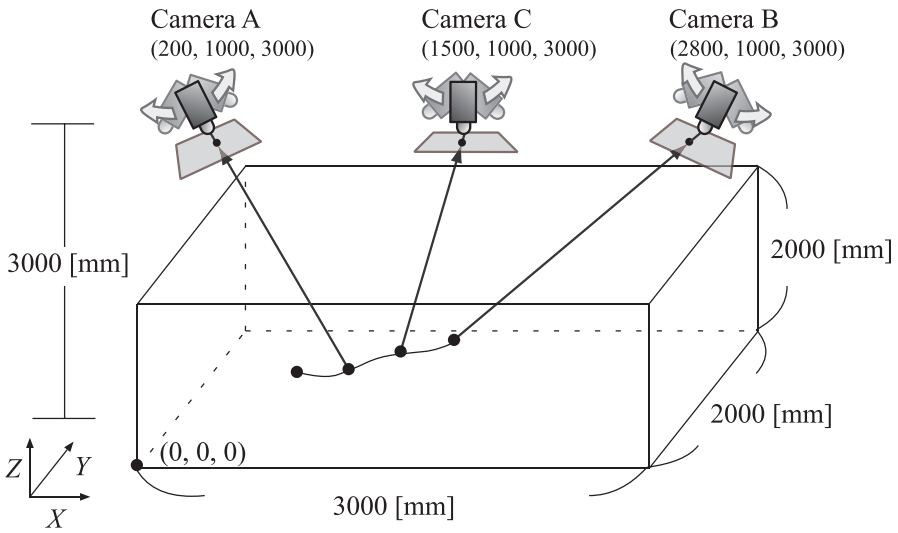


図 4.6: 仮想パン · チルトカメラの配置 (3 台)

では補間することが不可能なことからもわかる．一方，非等速運動は，ボールを落下させた時の放物運動となり，線形でも運動軌跡が補間できるため，提案手法と同精度で 3 次元位置を推定することができている．

提案手法では，螺旋運動の非等間隔以外のシーンにおいて 1 mm 以下の誤差で推定できていることが分かる．したがって，提案手法は，データの取得間隔に依存せずに 3 次元位置を推定可能であるといえる．螺旋運動で精度が悪くなる原因は，スプライン曲線と同様にスプライン曲面と光線が平行に近い際に，3 次元位置推定精度が下がるためである．

次に，表 4.2 に最新フレームの 3 次元位置の推定値と真値との平均誤差を示す．表 4.2 のステレオ視は，同期した対応する点を用いてステレオ視で 3 次元位置を算出し，最新フレームの位置を推定した際の誤差である．ステレオ視の最新フレームの推定誤差と比較すると，提案手法の螺旋運動における精度は低い．それに対し，非等速運動の精度が高い結果を得た．これは，提案手法における最新フレームの 3 次元位置推定が，最新フレームの光線を利用しているため，バウンド時の推定精度が向上しているためであると考えられる．

4.4.3 実際のカメラを用いた実験

実際にカメラを用いて等速円運動する対象物の 3 次元位置を推定する実験を行う．図 4.7 のように半径 160 mm のターンテーブルに対象物 (ボール) を乗せることにより等速円運動を発生させる．このとき，各手法で使用するカメラは以下のように設置される．

- スプライン曲面: 1 台の固定カメラと擬似的に左右に首を振る動作となるように 3 台のカメラを設置した擬似パン · チルトカメラ，カメラ間は非同期であり，カメラの内部 · 外部パラメータ

表 4.1: 3 次元位置と真値の平均誤差 (1 フレーム前) [mm]

		螺旋		非等速	
カメラの台数		2	3	2	3
スプライン曲面	一定	0.03	0.20	0.48	0.36
	ランダム	1.30	0.38	0.43	0.42
平面	一定	2.29	0.19	0.63	0.35
	ランダム	3.10	0.95	0.56	0.41

表 4.2: 3 次元位置と真値の平均誤差 (最新フレーム) [mm]

		螺旋		非等速	
カメラの台数		2	3	2	3
スプライン曲面	一定	0.11	0.50	1.35	1.15
	ランダム	5.78	1.04	1.30	2.43
平面	一定	10.46	0.49	1.09	1.14
	ランダム	6.23	2.23	1.15	4.77
ステレオ視	一定	0.16	0.17	1.63	1.79
	ランダム	0.25	0.26	2.57	2.65

は算出済みである．通常，パン · チルトカメラの回転行列 $\boldsymbol{R}_t$ は，ランドマーク点を用いたカメラキャリブレーションや，カメラを制御する上で既知のデータとして得ることが可能である．

- 平面: スプライン曲面と同じ条件
- ステレオ視: 2 台の同期固定カメラ

これらのカメラを用いて，スプライン曲線による 3 次元位置推定とスプライン曲面による 3 次元位置推定により，最新フレームの 3 次元位置を求める．比較対象はシミュレーション実験と同様に，非同期の対応点を用いたステレオ視とする．

4.4.4 実験結果

図 4.8 に各手法で最新フレームの 3 次元位置を推定した結果を示す．図 4.8(c) は同期した対応点を用いてステレオ視で 3 次元位置を算出し，1/60 秒後の 3 次元位置を 2 次曲線で推定した結果である．また，表 4.3 に最新フレームと 1 フレーム前の推定結果における円の半径の平均誤差と標準偏差を示す．表 4.3 のステレオ視は，同期した対応点を用いてステレオ視で 3 次元位置を算出し，1/60 秒後の 3 次元位置を 2 次曲線で推定した結果であり，ステレオ視における 1 フレーム前の 3 次元位置は，同期した対応点を用いてステレオ視で 3 次元位置を算出したものである．

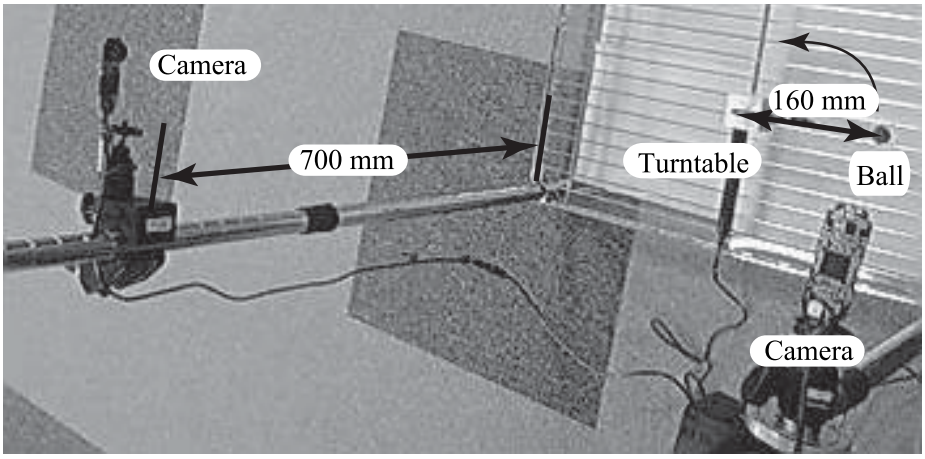


図 4.7: カメラの配置とターンテーブル

表 4.3: 真値との誤差と標準偏差 [mm]

手法	平均誤差		標準偏差	
	最新フレーム	1 フレーム前	最新フレーム	1 フレーム前
スプライン曲面	2.17	0.67	3.60	0.59
平面	6.76	2.60	4.56	1.98
ステレオ視	0.99	0.46	0.80	0.28

表 3.3 において，スプライン曲面と平面の精度を比較すると，スプライン曲線の方が高精度に 3 次元位置を推定出来ていることがわかる．また，線形では，1 フレーム前に比べ，最新フレームの方が精度が高い．これは，最新フレームを算出する際に，過去 3 フレームの 3 次元位置を 2 次関数に当てはめることや，光線の拘束により精度が向上したためであると考えられる．

表 4.3 から，1 フレーム前の半径の平均誤差では，通常のステレオ視と同等の精度で算出できていることがわかる．最新フレームでは，過去フレームの 3 次元位置推定の結果の標準偏差がステレオ視に比べ大きいため，平均誤差が 1 mm 程高くなっている．しかし，ボールの直径が 2cm であるため，1 mm は有意な差でないと考えられる．

4.4.5 処理時間

CPU Xeon 2GHz(x2)，メモリ 2GB の PC を使用して，処理時間の計測を行う．その結果，提案手法の 1 フレームにかかる処理時間は，約 0.5 ms となった．30 fps のカメラを n 台使用する場合にリアルタイム処理が可能であるかどうかは，$0.5\text{ms} < 1/(n * 30)\text{ms}$ で判定することができる．例えば，3 台使用する場合は，$0.5\text{ms} < 1/(90) = 11\text{ms}$ であり条件を満たすため，リアルタイム処理が可

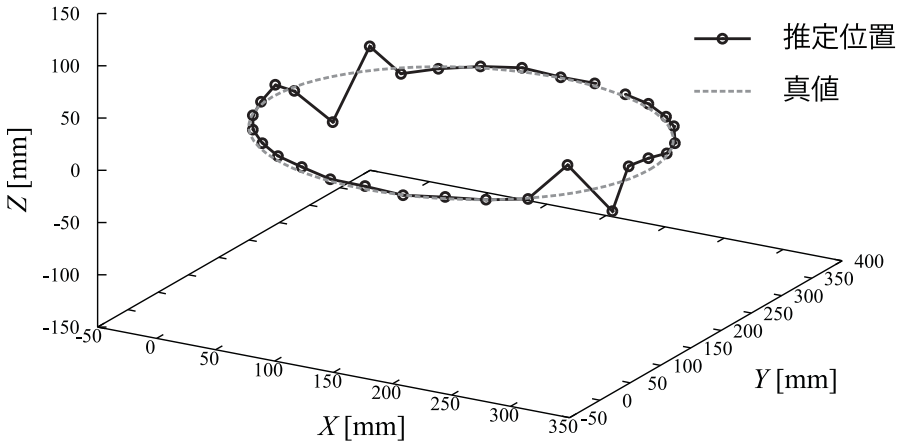
能である．

4.5 まとめ

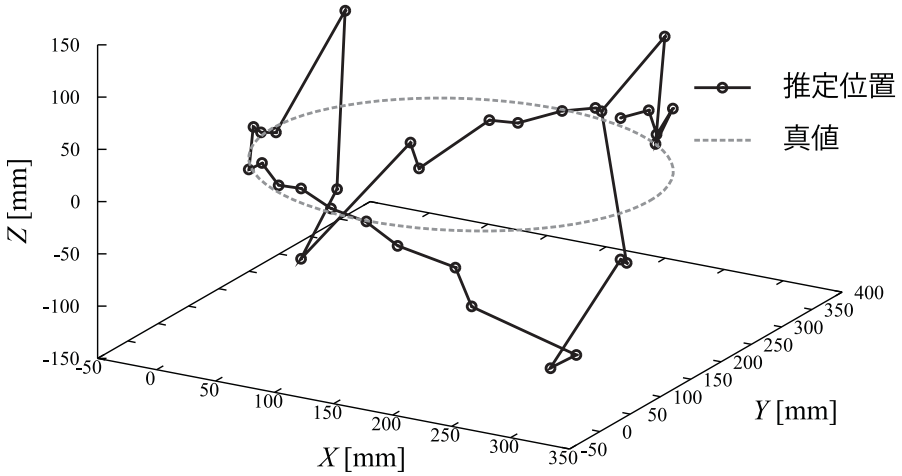
本章では，**3** 章で提案した固定非同期カメラの 3 次元位置推定法を拡張することにより，パン · チルト非同期カメラでも 3 次元位置を推定する手法を提案した．**3** 章では，画像座標上に対象物の軌跡を補間し，3 次元位置の推定をしたが，パン · チルトカメラは，画像平面の向きが同一ではないため，画像上に対象物の軌跡を推定することは不可能である．そこで，カメラの内部・外部パラメータを用いることで，3 次元空間中に曲面として対象物の軌跡を求める．この曲面と他方のカメラの交点を 3 次元位置とする．曲面と光線の交点を算出する手法は容易ではないため，曲面を平面の集合として扱うことで，交点を算出した．

シミュレーション実験と実際のカメラを用いた実験により，提案手法の評価を行った．シミュレーション実験では，提案手法とステレオ視が同等の精度であることを示した．円運動を復元する実験において，ステレオ視の半径の平均誤差は 0.99 mm であり，提案手法の半径の平均誤差は 2.17 mm と 1 mm ほどステレオ視に比べ精度が悪いが，ボールの直径が 2cm であるため，有意な差ではないと考えられる．そのため，シミュレーション実験と同様に，提案手法とステレオ視は同等の精度で 3 次元位置を推定できるといえる．

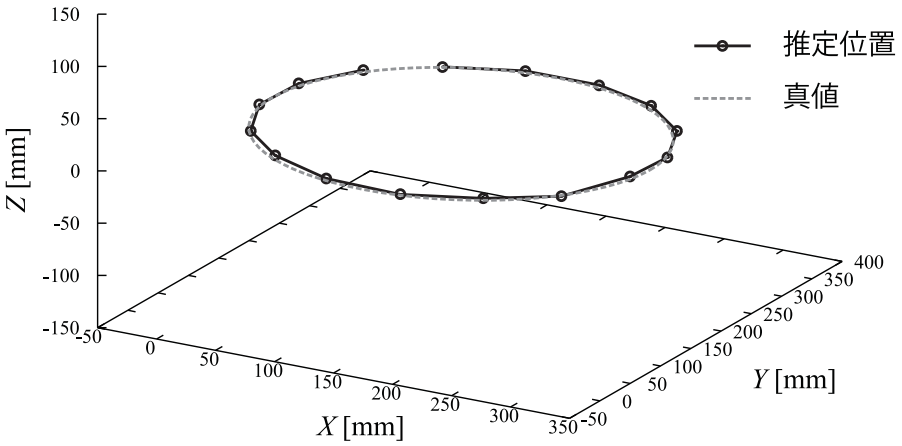
提案手法は，非同期パン · チルトカメラに対応することができ，広範囲で対象物の 3 次元位置推定が可能である．また，多眼にすることで，1 秒間にカメラの台数 ×30 ポイントと多くの 3 次元位置を出力することが可能である．そのため，広範囲に物体が移動する球技スポーツにおいてボールの 3 次元位置データの収集を行うことにより，スポーツの運動解析分野への応用が期待できる．



(a) スプライン曲面



(b) 平面



(c) ステレオ視

図 4.8: 3 次元位置推定結果

第5章

エッジの遷移を利用したSpace Sweeping法による3次元計測

3 章，**4** 章では，一つの対象物を非同期カメラを用いて 3 次元位置を推定する手法を提案した．これは対応点を必要とする．一方，3 次元シーンの理解や認識には，特定の対象物だけでなく，画像全体のエッジの 3 次元情報を求める必要がある．

従来，エッジの 3 次元位置を求める手法として Space Sweeping 法が提案されている．Space Sweeping 法は，世界座標系におけるある z 平面にエッジを投影した際の，投票数を基に奥行きを推定する手法である．この問題は，合焦判定における問題と酷似している．合焦判定を行う手法 [40, 41] が提案されている．これらの手法は，light field rendering 法に合焦判定を用いることで自由視点を作成する手法である．Space Sweeping 法と合焦判定を行う手法ともに，複数の z 平面を仮定し，その z 平面を基準とした奥行き推定や合焦判定を行うものである．この z 平面の間隔は奥行き推定の精度に影響し，より細かい間隔であるほど高精度になる．しかし，z 平面の数が増えた場合，処理コストの増加や，z 平面が存在しない個所の推定が不可能になるという問題がある．そこで，本章では，z 平面を移動した際のエッジの遷移を考慮することにより，z 平面を仮定しない手法を提案する．

5.1 では，従来法の問題点について述べる．**5.2** では，Space Sweeping 法におけるエッジの遷移について述べ，**5.3** において，エッジを用いた際のカメラの台数と配置の検討を行う．**5.4** において，エッジの遷移を利用した奥行き推定法について述べ，**5.5** において，候補点の削除方法について述べる．**5.6** では，非同期カメラへの展開について考察する．**5.7** と **5.8** で実験を行い，提案手法の有効性を示す．

5.1 従来法の問題点

従来法である Space Sweeping 法は，図 5.1 のように z 平面の 3 次元空間中にグリッドを作成し，エッジから作成される光線と z 平面の交点であるグリッドに投票することで奥行きを推定する．あるエッジから算出される光線 $\boldsymbol{l}$ は，以下の式で表わされる．

$$\begin{cases} x(z_i) = \delta(z_i)x(z_0) + (1-\delta(z_i))T_x \\ y(z_i) = \delta(z_i)y(z_0) + (1-\delta(z_i))T_y \end{cases} \qquad \delta(z_i) = \frac{z_i - T_z}{z_0 - T_z} \tag{5.1}$$

このとき (T_x, T_y, T_z) は 3 次元空間の焦点位置であり，z_0 は 0 番目の z 平面である．

Space Sweeping 法の奥行きの精度は，z 平面の移動間隔に依存し，算出可能な奥行きも z 平面をどこまで移動するかで決定される．また，z 平面をグリッド状に分割するため，グリッドの分割の仕方に依存して精度が変化する．z 平面の移動間隔とグリッドの分割数は，投票空間を作成する際のメモリに大きく係わり，細かくするほどメモリを多く使用するという問題がある．そこで提案手法では，z 平面におけるエッジ間の距離を定式化することで z 平面に依存する精度の解決を図る．

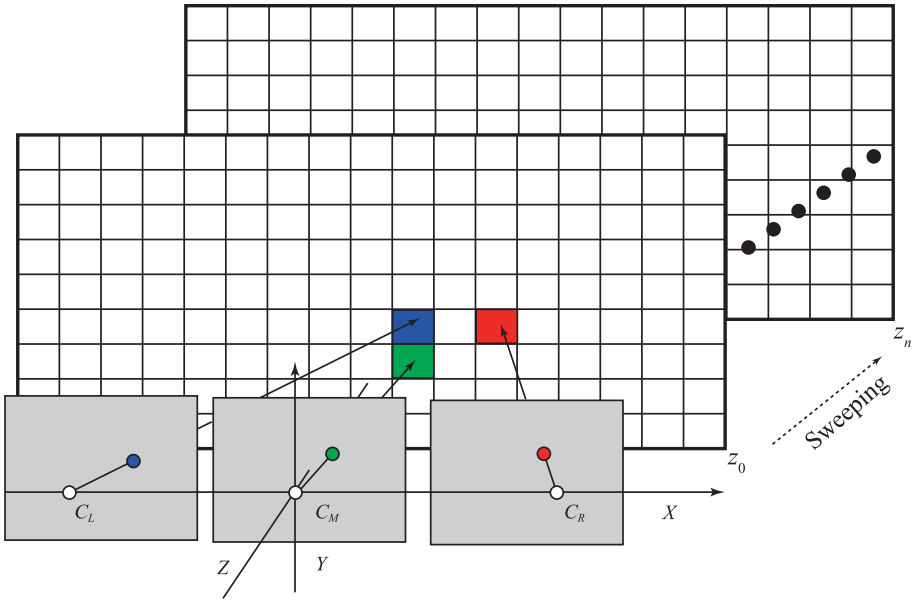


図 5.1: Space Sweeping 法

5.2 Space Sweeping 法におけるエッジの遷移

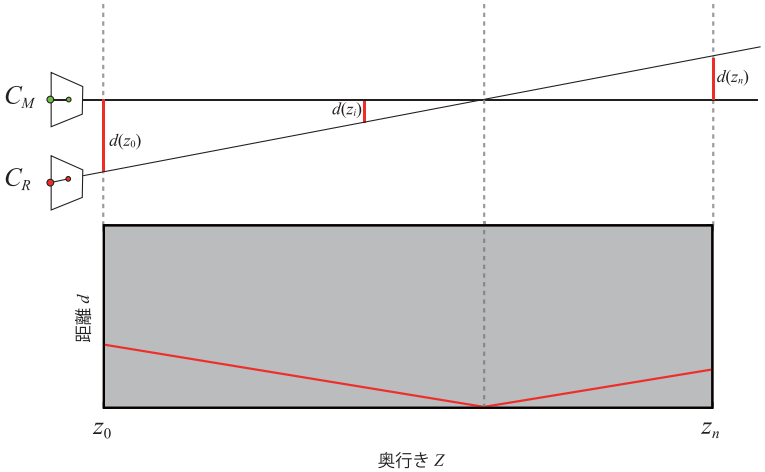
5.2.1 平面 z におけるエッジ間の距離

Space Sweeping 法は，z 平面を移動させ，奥行きの推定を行う．カメラが 2 台のときを例とすると，ある対象物の奥行きは，2 本の光線が交わる z であり，以下の式の距離 $d(z_i)$ が 0 になるときである．

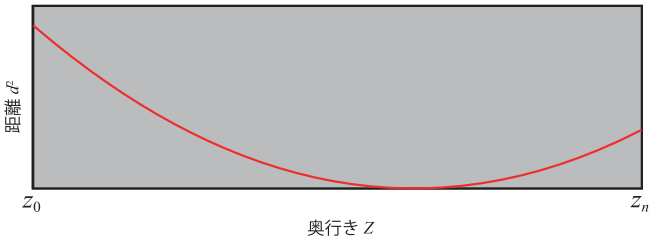
$$DEPTH = \underset{(0 \leq i \leq \mathrm{n})}{\arg\min}\ d(z_i) \tag{5.2}$$

$$d(z_i) = \sqrt{(x_c(z_i) - x_o(z_i))^2 + (y_c(z_i) - y_o(z_i))^2} \tag{5.3}$$

z 平面を移動させた際に算出される距離 $d(z_i)$ は図 5.2(a) のようになる．



(a) 距離 d の分布



(b) 距離 d^2 の分布

図 5.2: エッジ間の距離の算出

5.2.2 エッジ間距離の定式化

3 次元位置は z 平面を移動させた際の基準カメラとその他のカメラの距離が最小となる z 平面として決定され，式 (5.2) を用いて算出できる．しかし，z 平面を移動させるため，精度が z 平面の移動間隔に影響する．そこで，式 (5.3) を z が変数となるように定式化し，その式から距離が最小となる z を推定する手法の検討を行う．

まず，式 (5.3) の両辺を 2 乗して，平方根を取り，式を展開する．

$$
\begin{aligned}
d(z_i) &= \sqrt{(x_c(z_i) - x_o(z_i))^2 + (y_c(z_i) - y_o(z_i))^2} && (5.4)\\
d^2(z_i) &= (x_c(z_i) - x_o(z_i))^2 + (y_c(z_i) - y_o(z_i))^2 && (5.5)\\
&= x_c^2(z_i) - 2x_c(z_i)x_o(z_i) + x_o^2(z_i) + y_c^2(z_i) - 2y_c(z_i)y_o(z_i) + y_o^2(z_i) && (5.6)
\end{aligned}
$$

次に，$x_c^2(z_i)$ は式 (5.1) を用いて以下のように変形できる．

$$
\begin{aligned}
x_c^2(z_i) &= (\delta_c(z_i)x_c(z_0) + (1 - \delta_c(z_i))T_{c,x})^2 && (5.7)\\
&= (x_c^2(z_0) - 2x_c(z_0)T_{c,x} + T_{c,x}^2)\delta_c^2(z_i) + (2x_c(z_0)T_{c,x} - 2T_{c,x}^2)\delta_c(z_i) + T_{c,x}^2 && (5.8)
\end{aligned}
$$

ここで δ_c は，定数 $T_{c,z}$，z_0 と変数 z_i で構成されていることから，定数部をまとめて，

$$
\delta_c(z_i) = \lambda_c z_i - \lambda_c T_{c,z}, \quad \lambda_c = \frac{1}{z_0 - T_{c,z}} \tag{5.9}
$$

と置くことができる．この式を式 (5.8) に代入すると，以下の式が得られる．

$$
\begin{aligned}
x_c^2(z_i) &= (x_c^2(z_0) - 2x_c(z_0)T_{c,x} + T_{c,x}^2)(\lambda_c z_i - \lambda_c T_{c,z})^2 \\
&\quad + (2x_c(z_0)T_{c,x} - 2T_{c,x})(\lambda_c z_i - \lambda_c T_{c,z}) + T_{c,x}^2 && (5.10)\\
&= A\lambda_c^2 z_i^2 + (B\lambda_c - 2A\lambda_c^2 T_{c,z})z_i + A\lambda^2 T_{c,z}^2 - B\lambda_c T_{c,z} + T_{c,z}^2 && (5.11)\\
A &= x_c^2(z_0) - 2x_c(z_0)T_{c,x} + T_{c,x}^2 && (5.12)\\
B &= 2x_c(z_0)T_{c,x} - 2T_{c,x} && (5.13)
\end{aligned}
$$

この式は，変数 z_i における 2 次関数である．すなわち，式 (5.6) は，変数 z_i を持つ 2 次関数の集まりであることがわかり，エッジ間の距離は変数 z_i の 2 次関数で計算することが可能である．このときの，エッジ間の距離分布を図 5.2(b) に示す．

$$
\hat{d}(z_i) = az_i^2 + bz_i + c \tag{5.14}
$$

この式から 2 次関数の頂点が，エッジ間の距離を最小とする奥行きと距離となり，z 平面が生成されない奥行きでも推定可能となる．

5.3 カメラの台数と配置

前節では，エッジの遷移を利用した奥行き推定法について述べた．提案手法では，エッジを使用して奥行きを推定するため，エッジの分布とカメラの配置は精度に影響を与える．そこで本節では，カメラの台数と配置について検討を行う．

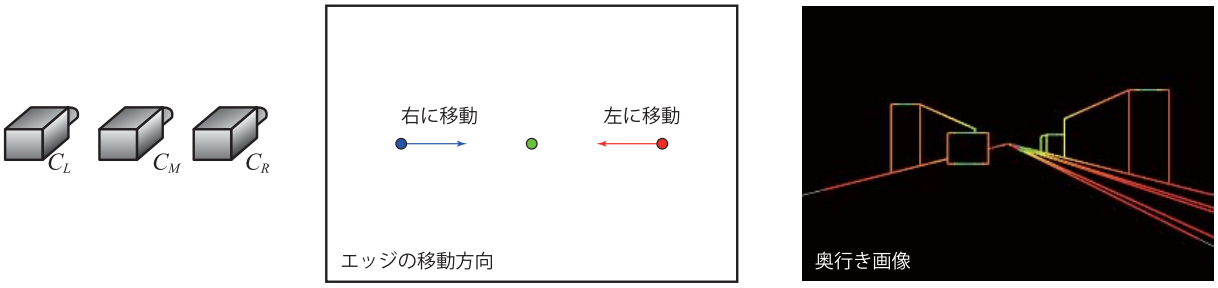
5.3.1 カメラの台数

提案手法では，1 台のカメラを基準として，そのカメラから発生する光線との距離を算出する．基準となるカメラともう 1 台のカメラの計 2 台のカメラで奥行きを推定することを考える．基準カメラの光線と対応するもう一方のカメラの光線は，複数の候補が存在する．正確な奥行きを推定するためには，正しい対応である光線を同時に選ぶ必要がある．しかし，エッジ情報を用いているため，一意に対応する光線を選択することは難しい．

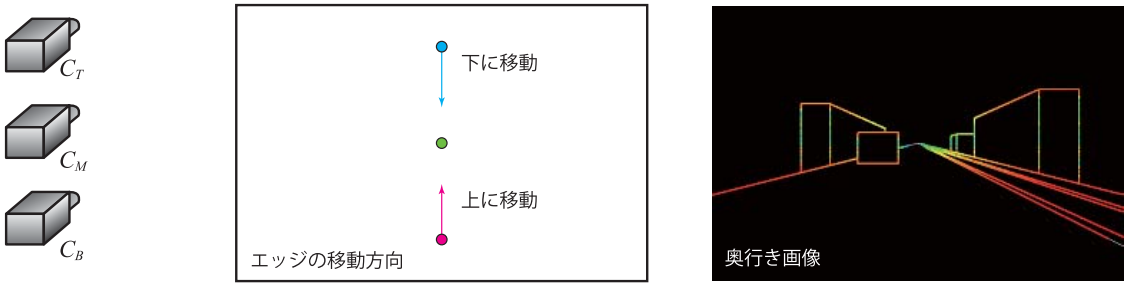
3 台のカメラにおいて光線の正確な対応が取れている場合，3 本の光線が交わることになる．そのため，対応候補である光線の中で，3 本交わるものが対応光線となる．したがって，提案手法では 3 台以上のカメラを必要とする．

5.3.2 カメラの配置

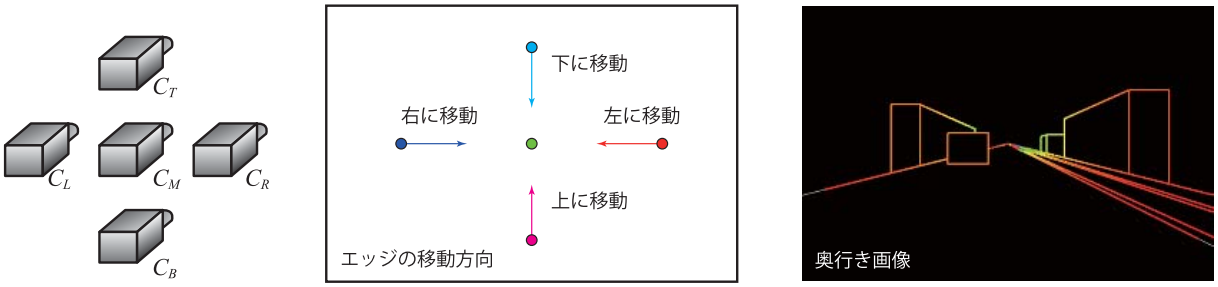
図 5.3(a) に示すように，カメラを水平に 3 台設置した場合，z 平面を移動させた際のエッジの移動は，同図のエッジの移動方向のようにカメラ C_L は右へ，カメラ C_R は左に移動する．そのため，水平ラインが画像上に存在する場合，エッジの重なる z 平面を一意に決定することができない．また，図 5.3(b) に示すように，カメラを垂直に 3 台設置した場合，z 平面を移動させた際のエッジの移動は，同図のエッジの移動方向のようにカメラ C_T は下へ，カメラ C_B は上に移動する．そのため，垂直ラインが画像上に存在する場合，エッジの重なる z 平面を一意に決定することができない．そこで，本手法では，図 5.3(c) に示すように，上下左右に設置したカメラ配置を使用する．



(a) 平行のカメラ配置



(b) 垂直のカメラ配置



(c) 十字のカメラ配置

図 5.3: カメラ配置に対するエッジの移動方向と奥行き推定例

5.4 エッジの遷移を利用した奥行き推定

提案手法では，エッジの遷移に着目し，カメラ C_M を基準カメラとした際の，各カメラのエッジの距離を基に奥行きを推定する．以下に奥行きを推定する流れを示す．

Step1 各カメラから入力された画像のエッジを算出

カメラの配置は前述したように十字型の配置を使用する (図 5.4(a) 参照)．図 5.4(b) のように得られた画像から Canny edge detector[22] を用いて，エッジ画像 (図 5.4(c)) を生成する．

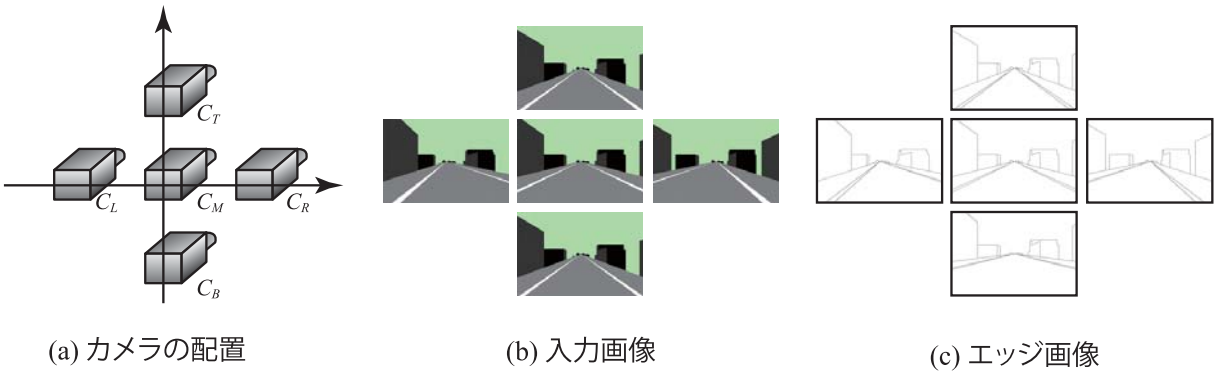


図 5.4: カメラの配置と入力・エッジ画像

Step2 基準カメラ C_M のエッジと対応するエッジの候補を各カメラの画像で探索

基準カメラ C_M の画像上のエッジは，各カメラの画像上に一点のみ対応するエッジが存在する．この対応点はエピポーラ線上に存在し，複数の対応点候補のエッジが選択される．カメラが正確に基準カメラ C_M を中心に十字に配置されている場合，図 5.5 に示すように左右に設置されているカメラの画像に引かれるエピポーラ線は，水平に引かれ，上下に設置されているカメラの画像に引かれるエピポーラ線は，垂直に引かれる．これらの線とエッジの重なるピクセルを対応点候補とする．

Step3 z 平面を変化させた際のエッジ間の距離を算出

正解の対応点が選択された場合，基準カメラのエッジから得られる光線とその他のカメラの対応点から得られる光線はある奥行き z で交わるはずである．基準カメラの光線と他のカメラの光線の奥行き z_i における距離の関係は，式 (5.14) より 2 次関数で定義できる．

$$\hat{d}_{cam}(z_i) = a_{cam} z_i^2 + b_{cam} z_i + c_{cam} \quad \{cam \in L, R, T, B\} \tag{5.15}$$

全ての対応点候補との距離を求めることで，図 5.2(b) のように距離マップを算出することができる．

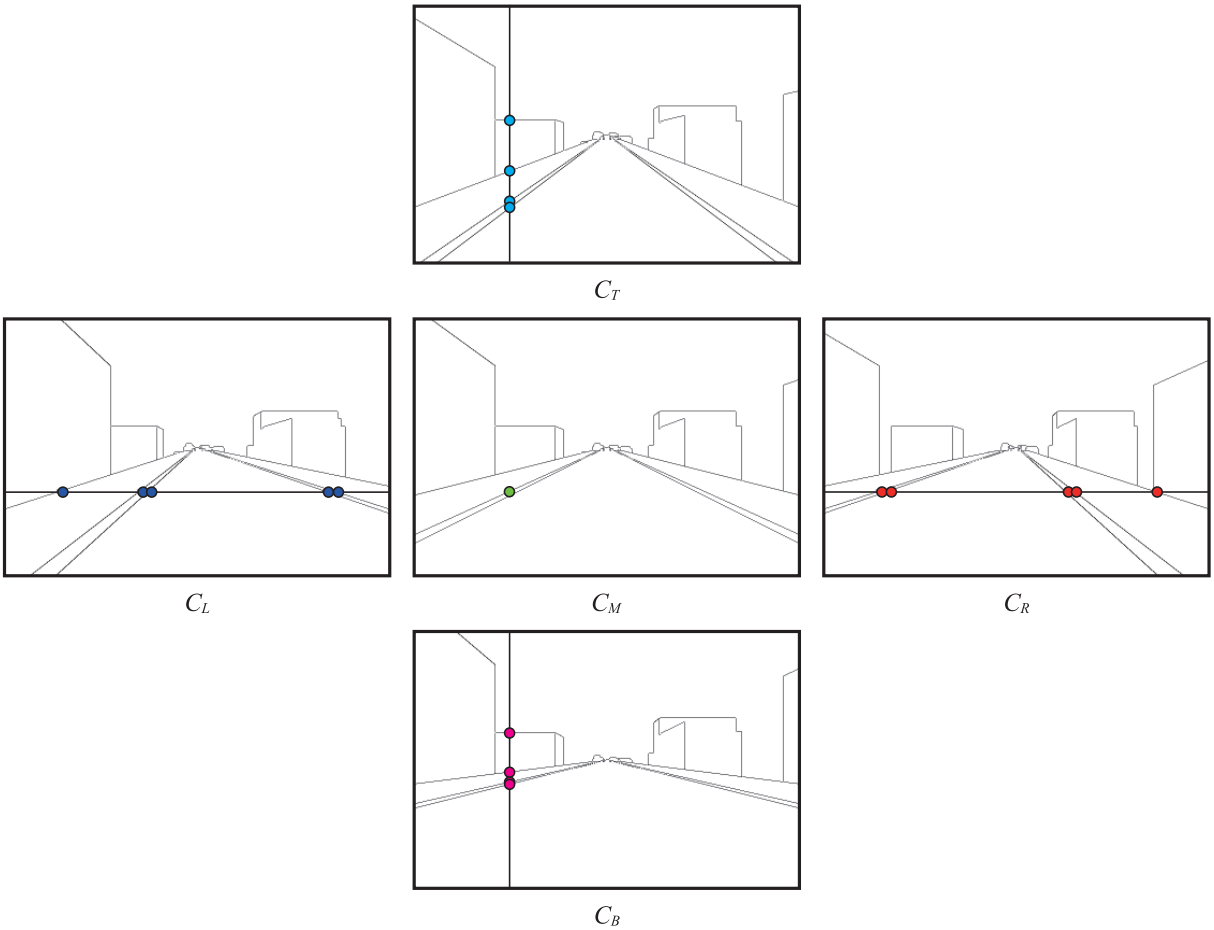


図 5.5: 対応点候補の決定

Step4 各カメラにおいて距離が最小となる z 平面を算出

式 (5.15) の最小値は，基準カメラとその他のカメラの光線の最短となる距離であり，そのときの z_i が奥行きとなる．奥行き z_i は，2 次関数から容易に算出可能である．

$$\hat{d}'_{cam}(z_i) = 2a_{cam}z_i + b_{cam} = 0 \tag{5.16}$$

$$z_i = -\frac{b_{cam}}{2a_{cam}} \tag{5.17}$$

したがって，このときの距離 d_{cam} は，

$$\hat{d}_{cam} = a_{cam}\left(-\frac{b_{cam}}{2a_{cam}}\right)^2 + b_{cam}\left(-\frac{b_{cam}}{2a_{cam}}\right) + c_{cam} \tag{5.18}$$

となる．

Step5 統合距離の算出

各対応点候補における基準カメラとの最小距離と奥行き z_i は，**Step4** で求められており，各カメラの対応点が正確ならば，この奥行き z_i において最小値を持つはずである．そこで，各対応候補点の奥行き z_i を選択し，その他のカメラから得られる候補点の奥行き z_i の距離を算出し，加算する (図 5.6 参照).

$$\hat{d}_{all}(z_C) = \hat{d}_L(z_C) + \hat{d}_R(z_C) + \hat{d}_T(z_C) + \hat{d}_B(z_C) \tag{5.19}$$

C は **Step4** で算出した各カメラにおける最小距離を持つ z 平面の番号である．

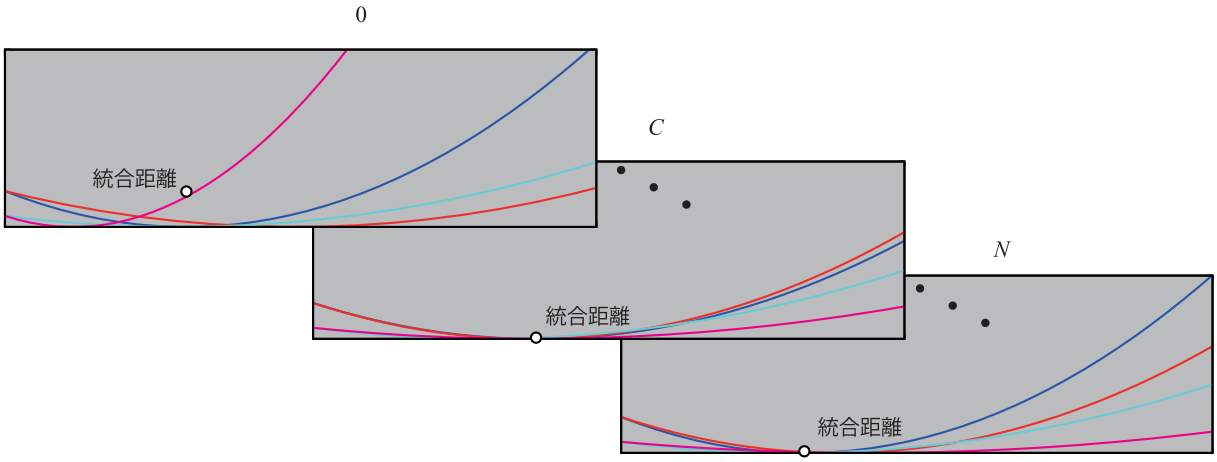


図 5.6: 各組み合わせによる統合距離の算出結果

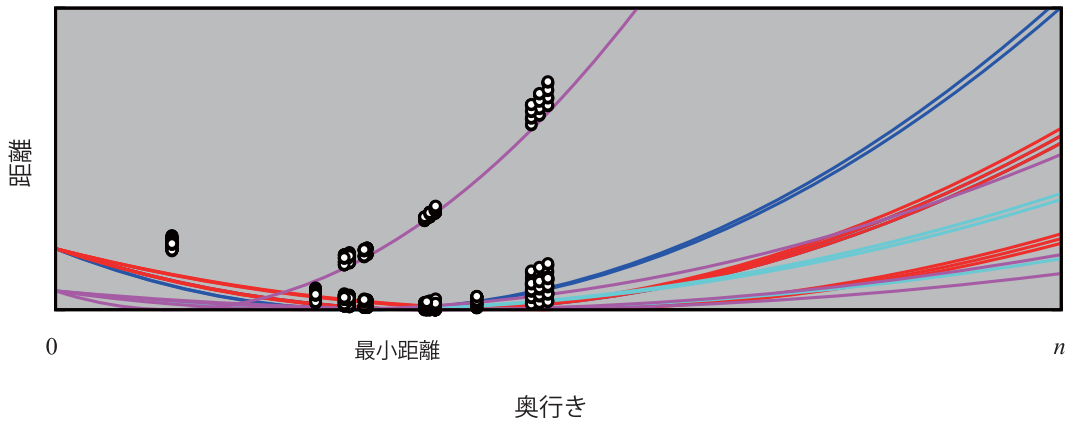


図 5.7: 奥行きの決定

Step6 統合距離が最小となる z 平面を奥行きと決定

図 5.7 のように，算出した統合距離の中でも最小となる距離を持つ z 平面を奥行きとして決定する．

$$DEPTH = \underset{(0 \leq \mathrm{C} \leq \mathrm{N})}{\arg\min}\, \hat{d}_{all}(z_c) \tag{5.20}$$

以上の処理を全てのエッジに対して行うことで，エッジの 3 次元位置を得ることが可能となる．

5.5 対応点候補の削減

対応点候補にエピポーラ線上のエッジを使用している．エピポーラ線上の点全てを対応点候補にした場合，多くの対応点候補が存在し，組み合わせが多くなり，処理時間がかかる．そこで，対応点候補の削減の検討を行う．

提案手法では，エッジ間の距離を算出し，最小値を探すことで奥行きを推定している．したがって，z 平面を移動した際に，エッジ間の距離が離れていく対応点候補は削除することができる．

次に，エッジの勾配方向を考慮に入れる．道路の白線などは，両端で勾配方向が反転するため，勾配方向は重要な役割を担う．勾配方向は以下の式で算出する．

$$\tan^{-1}\left(\frac{f_y(x,y)}{f_x(x,y)}\right), \quad \begin{cases} f_x(x,y) = I(x+1,y) - I(x-1,y) \\ f_y(x,y) = I(x,y+1) - I(x,y-1) \end{cases} \tag{5.21}$$

5.6 非同期カメラへの展開

本節では，非同期カメラへの展開について考察する．提案手法を非同期カメラへ適用した際，以下の 2 点が問題となる．

1. 図 5.8 に示すように，エピポーラ線上の対応点候補が正解対応点候補とは限らない
2. 正解対応点が選択できた場合でも，時間ずれを含むため，時間ずれにより発生する対象物の移動を考慮する必要がある

この 2 点の問題を解決することにより，非同期カメラへ適用可能な手法となる．

1. の問題は，対応点候補をエピポーラ線上以外からも選ぶことで解決できる．時刻ずれを含む画像における対応点は，エピポーラ線付近に存在するはずであることから，エピポーラ線付近にも探索線を設けることで対応候補点の選択漏れを回避することが可能である．

2. の問題は，対応候補点をエピポーラ線上に射影することにより解決を図る．同時刻における対応点はエピポーラ線上に存在するはずである．したがって，エピポーラ線付近で選出した対応点候補をエピポーラ線上に射影し，新たな対応点候補とする．

以上の処理により，対応点候補を選出した後，提案手法と同様の処理で奥行きを求めることが可能となる．

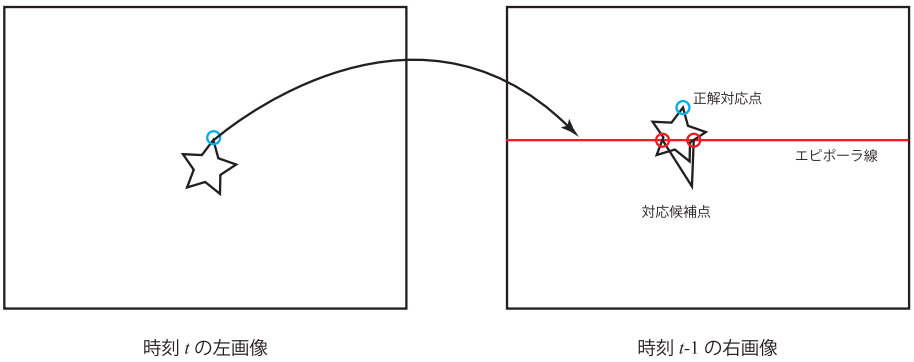


図 5.8: 非同期カメラにおける対応点候補

5.7 シミュレーション実験

本手法の評価を行うため，CG を用いたシミュレーション実験を行う．CG 画像は仮想 3 次元空間に道路を作成し，OpenGL を用いて作成する．カメラは 5 台を十字型に配置し，図 5.9 に示す画像を入力画像とする．

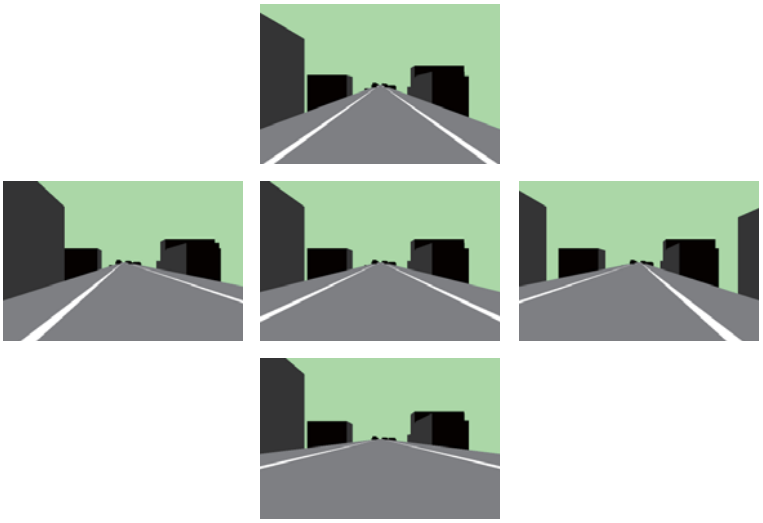


図 5.9: 入力画像

5.7.1 対応点候補の削除と組み合わせ回数

5.5 で述べたように，対応点候補は，絞り込むことが可能である．また，不必要な対応点候補を削除することにより，組み合わせ回数も変化するため，処理コストにも影響を与える．そこで，対応点候補を削除する前と後での組み合わせ回数の比較を行う．

組み合わせ総数を算出した結果，対応点候補を削除する前は，約 39 億通りの組み合わせであり，対応点候補を削除後は約 0.5 億通りとなり，約 39 億通りの組み合わせを減らすことができた．

5.7.2 奥行き推定実験

CG 画像を用いて奥行き推定実験を行う．評価対象に従来法として，z 平面を移動し，その z 平面で逐次基準カメラとその他のカメラとのエッジの距離を算出する手法を用いる．z 平面の移動間隔は，50 mm，100 mm，500 mm，1000 mm とする．

図 5.10 に提案手法と従来手法で奥行きを推定した結果を画像に表示した例と，3 次元空間に投影した例を示す．従来法では，移動間隔が狭くなるほど精度が向上する．そのため，白線エッジの近距

離の推定結果が移動間隔を狭くするほど直線に近づくことがわかる．しかし，移動間隔が狭くなるということは，処理回数が増えることを意味し，処理時間の増大が問題となる．一方，提案手法では，移動間隔が 50 mm のときと同等の精度で形状を復元できていることが分かる．

また，提案手法は z 平面の移動制限がないため，従来法のように推定対象の z 平面が存在しないことによる誤対応を軽減させることが可能である．図 5.11 に，奥行き推定例における道路中心部分の拡大した図を示す．シミュレーションで作成した 3 次元モデルは，画像の中央部の対象物の奥行きは十分遠い場所に存在する．そのため，x 座標が 0 に近い箇所の奥行きは遠いはずである．しかし，従来法は提案手法に比べ，多くの点が存在していることがわかる．この原因は，誤対応による奥行き推定の失敗によるものである．提案手法は，2 次関数で奥行きを推定するため，z 平面が存在しないために発生する誤対応を防ぐことが可能となる．

5.7.3 従来法との定量的評価

提案手法と従来法の精度を定量的に評価するために，図 5.12 のように，3 次元空間中に直線を引き，それを画像に投影したものを入力画像とする．表 5.1 に各手法により形状を復元し，その線との距離の平均誤差を算出した結果を示す．表から分かるように，提案手法は移動間隔を 50 mm としたものより，良い精度で推定出来ていることがわかる．また，図 5.13 に奥行きに対する真値との誤差を示す．提案手法と従来法を比較すると，推定する奥行きが遠いときと奥行きが近いときに，提案手法の誤差が小さいことがわかる．これは，奥行きを推定するための最適な z 平面を作成できていないため，誤差が大きくなる．移動間隔を狭めることで，誤差を減らすことが可能であるが，移動間隔を狭めると使用するメモリ使用量が増えるという問題がある．したがって，提案手法における奥行きの推定法は，移動間隔に依存しない手法であり，従来手法より適応的に奥行きを推定できることがわかる．

次に，提案手法と従来法のメモリ使用量について考察する．従来法では，グリッドの分割数と z 平面の移動回数を設定する必要がある．グリッドの分割数を $N \times M$ とし，z 平面の移動回数を n とすると，メモリ使用量は投票空間と等価であるため，$N \times M \times n$ となる．一方提案手法では，2 次関数の 3 パラメータを各カメラ毎保持する必要がるため，カメラの台数を k とおくと，$3 \times k$ のメモリ使用量となる．したがって，提案手法ではカメラの台数 $\times 3$ という少ないメモリ使用量で奥行きを算出することが可能である．

表 5.1: 直線との平均誤差 [mm]

	提案手法	従来手法			
		50 mm	100 mm	500 mm	1000 mm
誤差	13.9	14.9	17.6	53.9	183.6

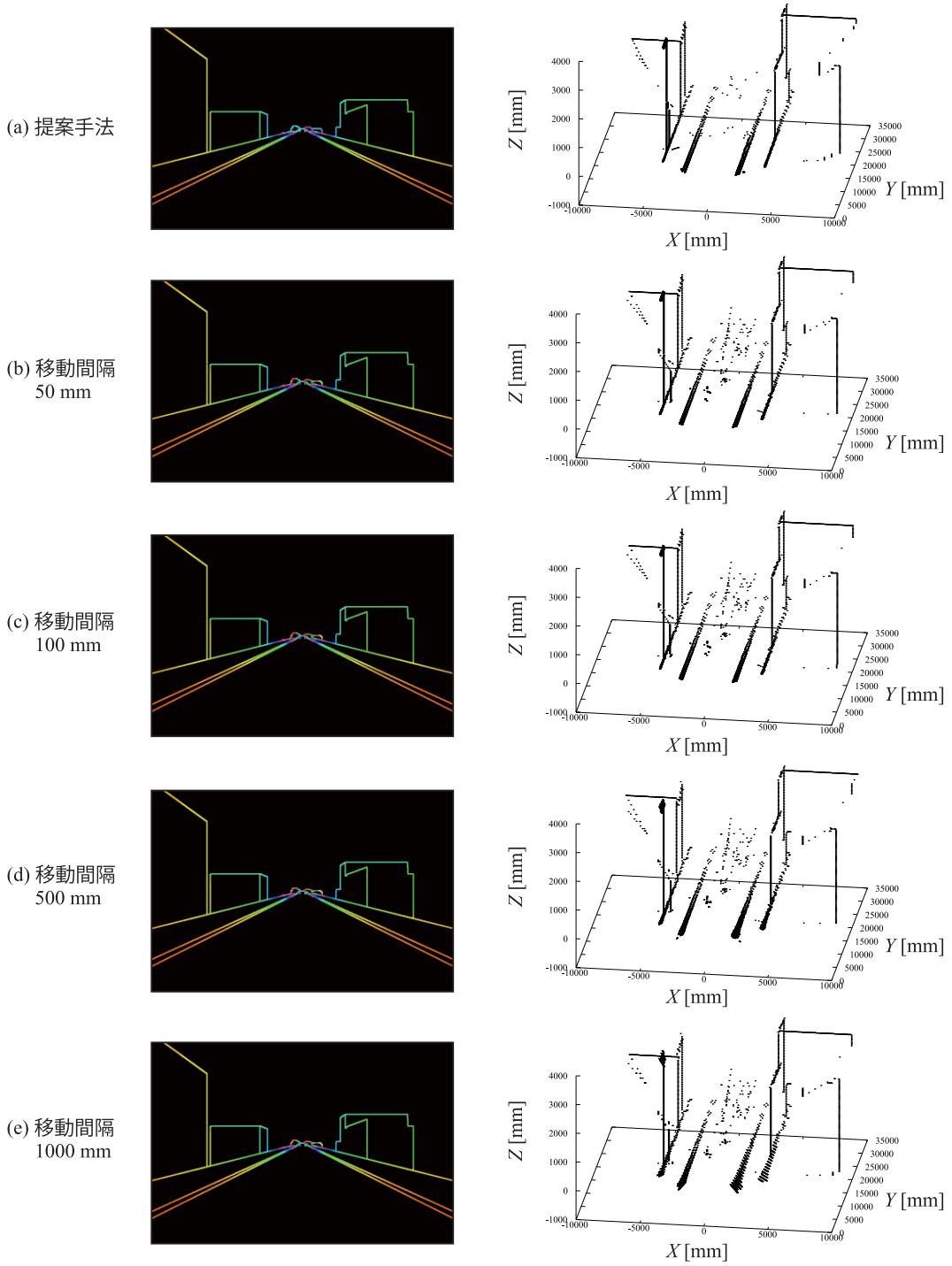
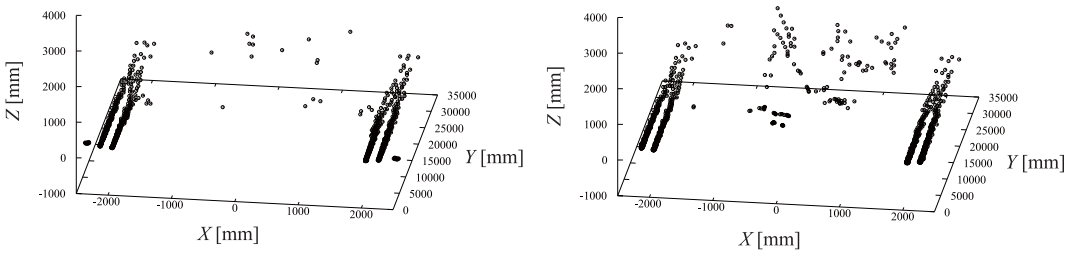


図 5.10: シミュレーション実験による奥行き推定例



(a) 提案手法　　(b) 移動間隔 50 mm

図 5.11: 誤対応による奥行き推定誤差

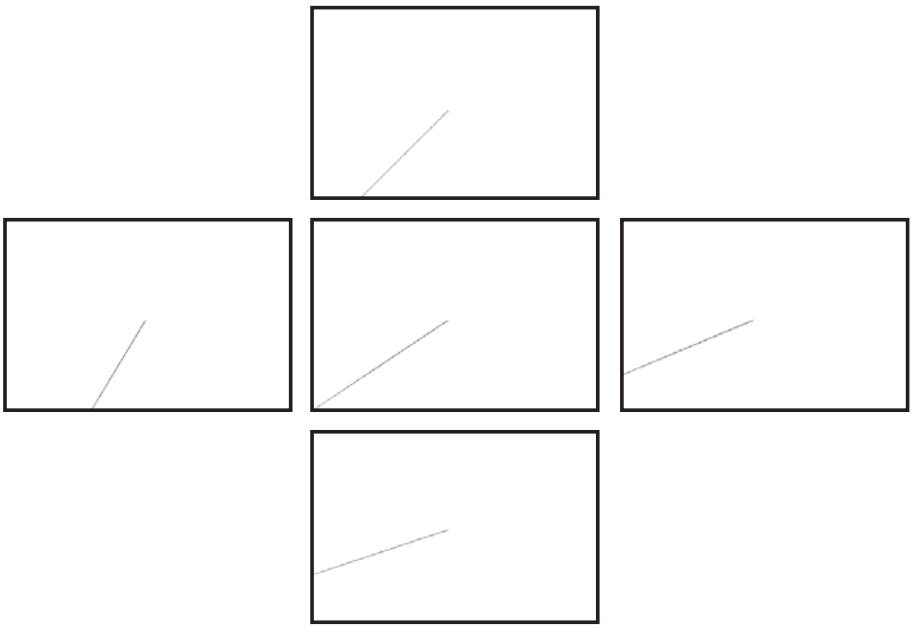


図 5.12: 定量的評価における入力画像

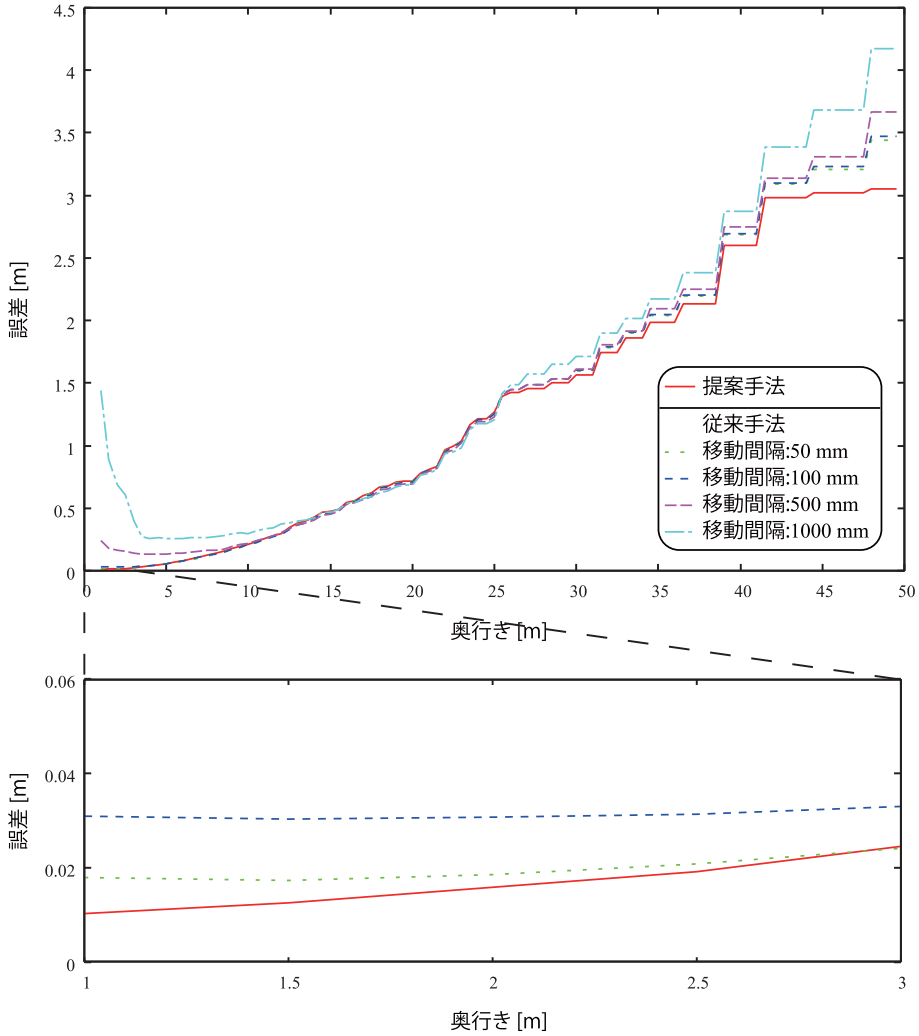


図 5.13: 奥行きに対する真値の誤差

5.8 実カメラを用いた実験

本節では，実際にカメラを使用して奥行きを推定する実験を行う．使用するカメラは，上下左右に設置し，ベースラインを約 25 mm とする．図 5.14 に入力画像を示す．各カメラは予めキャリブレーション済みであり，カメラの内部・外部パラメータ，レンズ歪係数は取得済みである．これらの画像を入力することにより，提案手法における奥行き推定を行う．図 5.15 に提案手法で奥行きを推定し，奥行きを色で表現した例を示し，同図 (b)(c)(d) に，3 次元空間に投影した際の 3 視点からの表示を示す．同図 (b) では，筒が手前に推定されていることがわかり，床の四角の模様の距離が推定できていることがわかる．同図 (c) では，床に設置してある板の連続的な奥行き変化が表現できていることがわかる．同図 (d) では，コップの縁が推定されていることがわかる．しかし，コップ内の模様の推定はうまくできていないことがわかる．これは，エッジが複雑に存在するため，エッジの正しい対応が求められないことが原因であると考えられる．

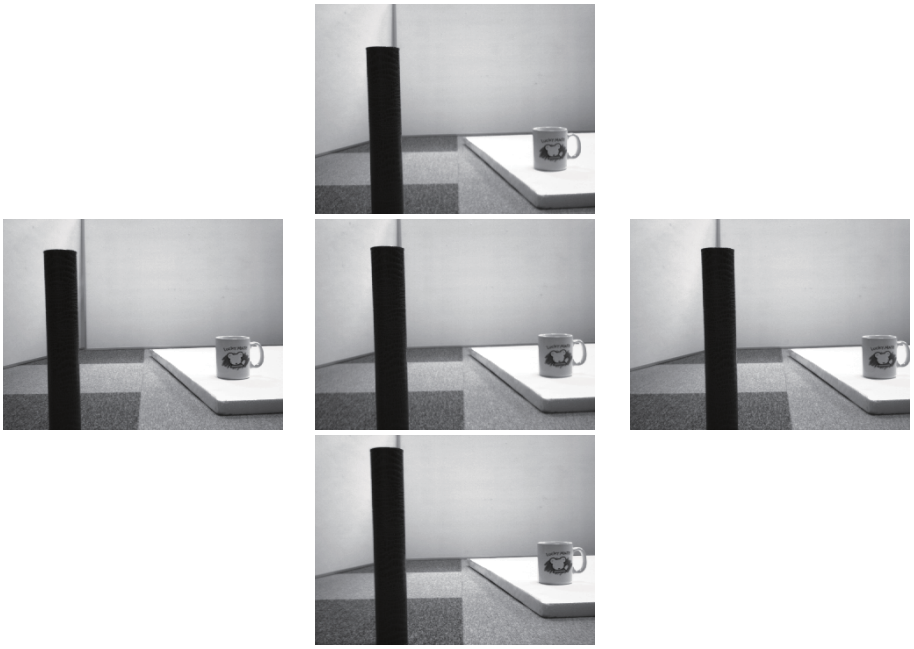
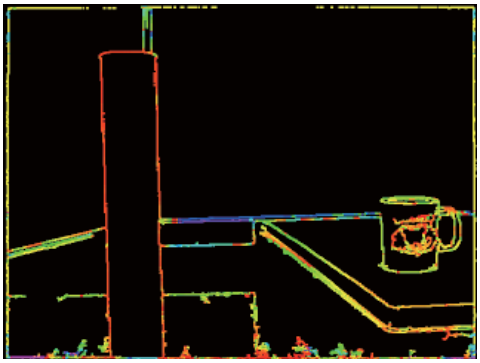


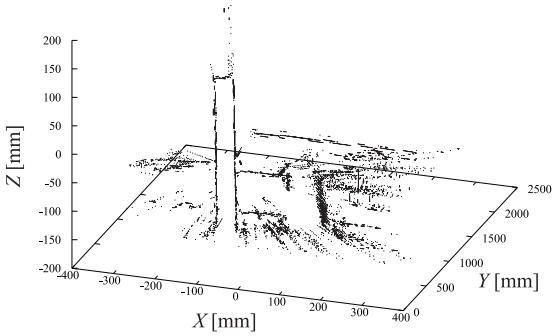
図 5.14: 入力画像

5.9 まとめ

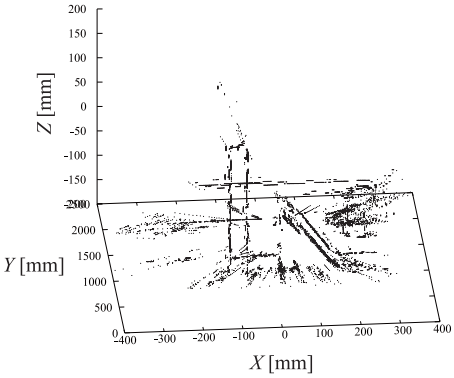
本章では，エッジの移動方向に着目することにより，z 平面への投票を必要としない手法を提案した．z 平面を移動した際の基準カメラとその他のカメラのエッジ間の距離を定式化することで，エッジ間の距離が最小となる位置を式から導き出すことができる．そのため，z 平面の移動間隔に依存す



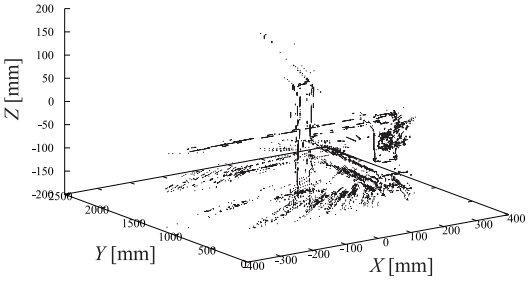
(a) 出力画像



(b) 視点 1



(c) 視点 2



(d) 視点 3

図 5.15: 実カメラ実験による奥行き推定例

る従来法と違い，提案手法は一定の精度で奥行きを推定することが可能である．これは，シミュレーション実験の定量的評価により検証した．実際のカメラを用いた実験においても，前方，後方，手前から奥へと続くエッジを確認できていることから，提案手法の有効性を示した．

第6章

視線誘導標の3次元位置を用いた道路構造認識

3 章，**4** 章では，非同期カメラを用いて特定の対象物 (点) の 3 次元位置を推定する手法を提案した．本章では，対象物を視線誘導標とすることで車載カメラへの展開として，道路構造の認識を提案する．**6.1** において，背景を述べ，**6.2** で，道路の成り立ちについて述べる．**6.3** では，検出対象である視線誘導標について述べ，**6.4** では，視線誘導標の検出手法について述べる．そして，**6.5** において，道路構造の認識手法を述べた後に，**6.6** で，視線誘導標の検出精度を求める実験を行い，**6.7** で，道路構造の分類精度の検証を行う．

6.1 背景

近年 ITS(Intelligent Transport Systems) は，盛んに研究され，国内外で様々なシステムが提案されている．その一つに安全運転の支援があり，事故等を未然に防ぐシステムの実現が重要な課題となっている．安全運転支援の一アプローチとして，自動車の自動運転に関する研究が行われており，NAVLAB[42] では，カメラとレンジデータを用いることによりアメリカの西海岸から東海岸への横断に成功している．

人が自動車を運転する際，進行方向を注視し道路線形を把握し，走行，避走，停止などを行う．この道路線形の把握には白線が重要な役割を担い，白線の自動検出は運転者への支援に重要な技術である．白線の検出には，モデルベースで求める手法 [43, 44, 45] やクロソイド曲線 [46] やスプライン曲線 [47] を当てはめる手法が既に提案されている．さらに，この白線情報を用いて道路構造を求める手法 [48, 49] や運転制御を行う手法 [50]，自車両位置を求める手法 [51] が提案されている．しかし，これらの白線検出に基づく手法は日中を対象としている場合が多く，夜間での運用は白線情報を得ることができる範囲が限られるため，遠方の道路線形の認識に支障をきたす恐れがある．

また，運転者は前方車両や対向車の情報，通り慣れた道ならば事前知識を用いて走行する．しかし，前方車両や対向車がなく，事前知識のない山道では，前照灯より映し出される景色から情報を集め走行する必要があり，運転者への負担が大きくなると考えられる．そこで我々は，山道などの夜間の運転補助として，100 m 先まで視認することが可能である視線誘導標から道路構造を認識することを目的とする．提案手法では，道路構造の成り立ちに基づき，視線誘導標の 3 次元位置を推定し，その 3 次元位置にクロソイド曲線を当てはめることにより，道路構造の認識を行う．

6.2 道路の設計法

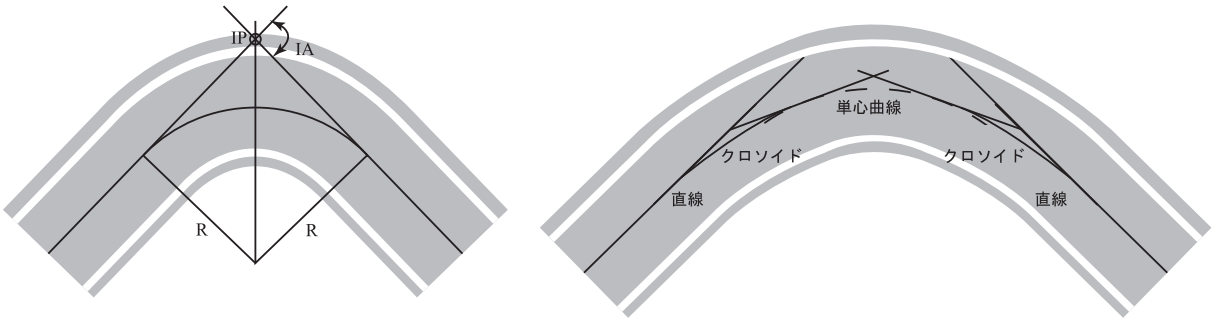
道路構造を認識するためには，道路の設計に沿った手法が適切であると考えられる．そこで，本節では道路の設計法について述べる．

6.2.1 中心線

道路は，基本的に一本の線から作成される．この基本になる線を中心線 (センターライン) と呼ぶ．地形に沿ってルートを計画した場合，中心線は当然どこかで曲がることになる．図 6.1(a) のように，曲がる前の直線と曲がった後の直線の交点を IP，交差する角度を IA で表す．

6.2.2 カーブ

直線の交点 IP で急に曲がろうとしてもスピードの出ている車は，スムーズに曲がることができない．また，車の構造上ハンドルを切って曲がるときには常に曲線を描いて曲がる．そこで、2 本の直



(a) 単心曲線　　(b) クロソイド曲線

図 6.1: カーブの成り立ち

線を曲線でつなぐことにより，より走りやすい道路を設計する．この曲線には次のような種類のものが用いられている．

- 円曲線
  - 単心曲線
  - 複心曲線
  - 反向曲線
- 緩和曲線
  - 3 次放物線
  - レミニスケート
  - クロソイド曲線

一般的に，円曲線では単心曲線を，緩和曲線ではクロソイドが用いられる．単心曲線は，図 6.1(a) に示すように，2 本の直線を半径 R の円で結ぶ曲線である．またクロソイド曲線は，図 6.1(b) のように，単心曲線と直線の間に設けられる．

6.2.3 クロソイド曲線

クロソイド曲線は前述した様に緩和曲線の一種であり，曲率 κ を持ち一定の変化量を持つ螺旋である．

$$\kappa(l) = \frac{1}{R(l)} = C_0 + C_1 l \tag{6.1}$$

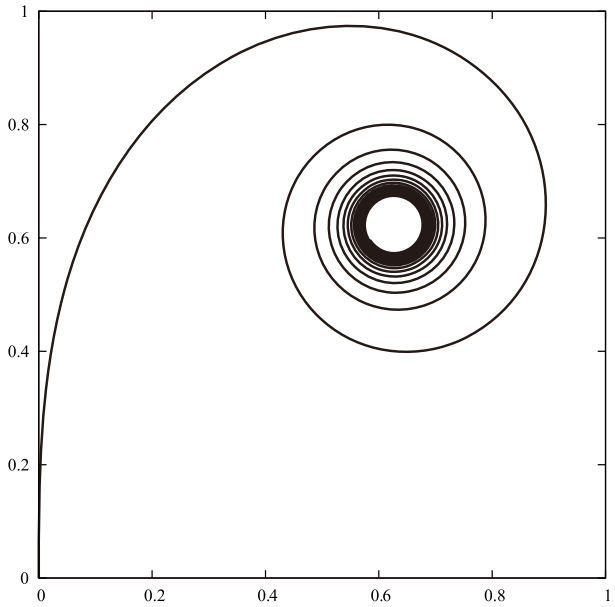


図 6.2: クロソイド曲線の描画例

l は曲線座標系であり，$R(l)$ は曲率の半径，$C_0[\mathrm{m}^{-1}]$ は $l=0$ での初期曲率，$C_1[\mathrm{m}^{-2}]$ は一定の曲率変化率である．C_0 と C_1 が共に 0 のとき，直線となり，C_1 のみが 0 のときは，円となる．接戦曲線の角度変化 $\Delta\theta$ は，次式により算出できる．

$$\Delta\theta(l) = \theta(l) - \theta_0 = \int_0^l \kappa(\tau)d\tau = C_0 l + \frac{1}{2}C_1 l^2 \tag{6.2}$$

$l=0$ であるクロソイド曲線の始点 (x_0, y_0) を考慮すると，式 (6.2) は，

$$\begin{cases} x(l) = x_0 + \int_0^l \sin\theta(\tau)d\tau \\ y(l) = y_0 + \int_0^l \cos\theta(\tau)d\tau \end{cases} \tag{6.3}$$

と表すことができる．さらに，クロソイド曲線の始点は一般的に，$(x_0 = y_0 = 0)$ と置くことができ，初期の y 軸との角度は $(\theta_0 = 0)$ とすることができるため，次式のように表すことができる．

$$\begin{cases} x(l) = \int_0^l \sin\left(C_0\tau + \frac{1}{2}C_1\tau^2\right)d\tau \\ y(l) = \int_0^l \cos\left(C_0\tau + \frac{1}{2}C_1\tau^2\right)d\tau \end{cases} \tag{6.4}$$

図 6.2 にこの式を用いて作成したクロソイド曲線を示す．式 (6.4) は数値的にのみ評価することができるため，近似式が使用される．θ が十分小さいとき，$\sin\theta$ と $\cos\theta$ のテイラー展開を一次の項まで行う．

$$\begin{cases} x(l) = \frac{1}{2}C_0 l^2 + \frac{1}{6}C_1 l^3 \\ y(l) = l \end{cases} \tag{6.5}$$

この式は近似式としてよく使用されている．

6.3　視線誘導標

視線誘導標は，車道の側方に沿って道路線形等を明示し，運転者の視線誘導を行う施設をいう．夜間走行する場合，ドライバーは前照灯によって進行方向を照らして道路線形等を把握し，走行，避走，停止など判断している．しかし，前照灯によって明確に把握できる範囲は限られているため走行基準を得ることが困難となり，安全かつ円滑な運転に支障が生じる場合がある．この問題に対処するために道路の付属物として，図 6.3(a) に示す視線誘導標が設置されている．視線誘導標は主にカーブに設置され，カーブ毎に設置間隔が決められている．図 6.3(b) の例では，白線の見えからドライバーは直線道路と認識するのに対し，視線誘導標からは，この先に右カーブがあるということがわかる．このように，視線誘導標は夜間での遠方の視認性に優れており，視線誘導標を自動検出することでドライバーの運転支援が期待できる．視線誘導標の設置基準等は視線誘導標設置基準・同解説 [52] にて詳しく記されている．

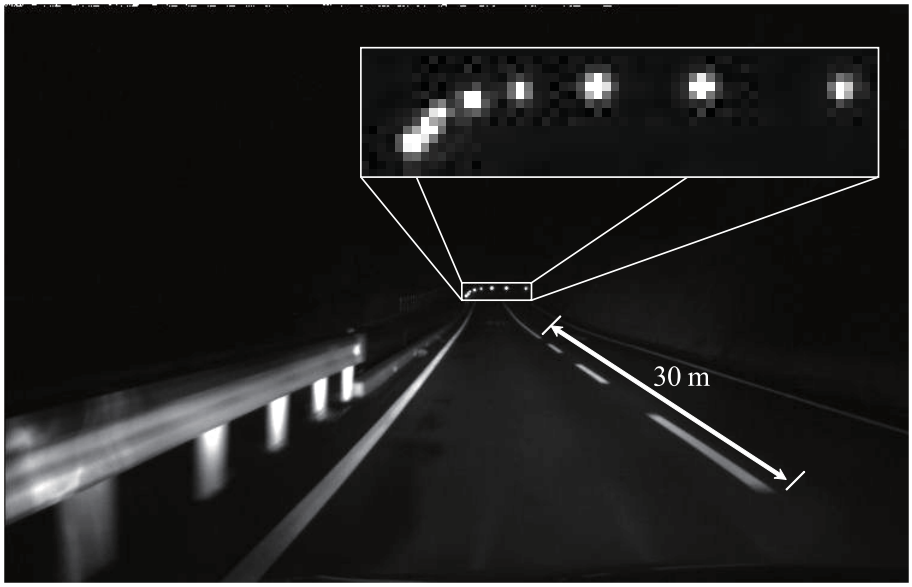
6.3.1　視線誘導標の構造

■ 各部材の名称

視線誘導標の各部材の名称の意義を以下に示し，図 6.4 に各部材の名称を示す．

1. 反射体
   視線誘導標の本体で自動車の前照灯による光線を再帰反射するものであり，容易に反射性能の低下，変色，破損などが生じないものとする．
2. 反射体取り付け枠
   反射体を支柱に取り付けるためのものであり，反射体を裏面，周囲から保護するためのものである．そのため，反射体を確実に固定できる構造でなければならない．反射体が直接支柱に取り付く構造になっている場合や接着剤等で直接支柱に確実に固定できる場合には反射体取り付け枠は不要である．
3. 反射器
   反射体および反射体取り付け枠からなる部分．
4. 支柱
   反射器を所定の位置に固定するものであり，軽微な外力により反射器が移動しないものでなければならない．

(a) 視線誘導標



(b) 白線と視線誘導標

図 6.3: 視線誘導標と夜間の見え

■ 構造形状

- 反射体

反射体の直径は図 6.5 に示すように有効反射面積の内径であり，70 mm 以上 100 mm 以下と決められている．反射体の直径は大きいほど反射光量が増加し遠方からの視認性がよいので，自動車の走行速度が高い場所，路外の危険度が高い場所等のような区間は大きい反射体を設置することが望ましい．原則として，矩形 (縦長と横長の場合がある) は使用しないが，やむを得ず使用する場合は所定の有効反射面積を確保するものでなければならない．

反射体の裏面は図 6.5 に示すように裏蓋で密閉し，水，ごみ等の入らない構造としなければならない．

- 支柱

支柱は，設置計画で規定する空間位置に確実に固定するものであり，そのための構造を備えていなければならない．防護柵，高欄 (橋などにつけた人が落ちるのを防ぐための壁)，擁壁 (崖

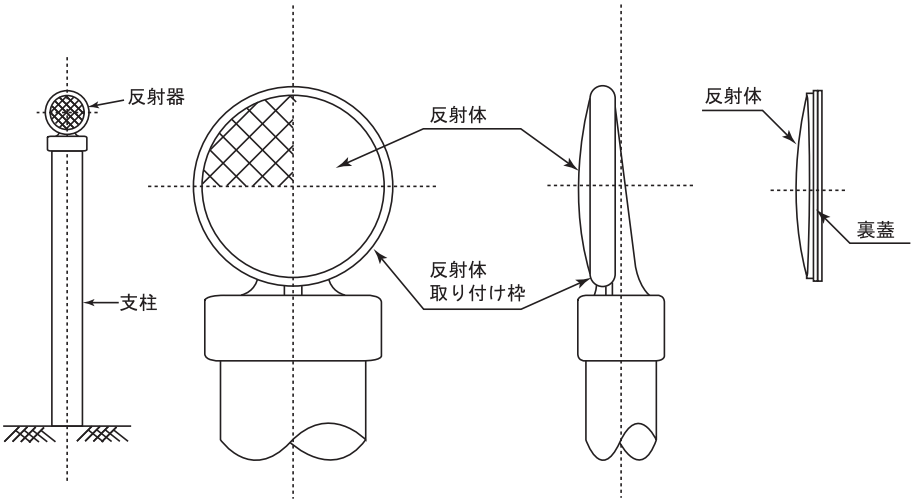


図 6.4: 各部材の名称

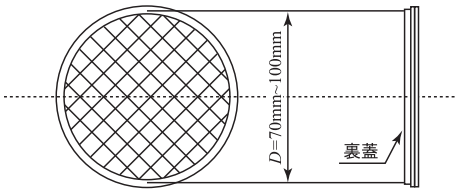


図 6.5: 反射体の大きさ

や盛り土の側面が崩れ落ちるのを防ぐために築く壁) 等がある場合にはこれを利用して取付金具により取り付けることができる.

支柱の形状は円筒形を標準とする．また，支柱の諸元 (長さ，外径，厚さ) は，その設置場所，設置条件，材質等に応じた適切な値を有していなければならない．表 6.1 は，支柱の諸元について，標準的な設置条件を仮定して，その望ましい値を示したものである.

表 6.1: 支柱の諸元

設置場所	設置条件		長さ [mm]	材質 (外径 [mm]× 厚さ [mm])		
	反射体の設置高さ [cm]	基礎の種類		鋼	アルミニウム合金	合成樹脂
一般国道等	90	コンクリート	1,150	34 × 2.3 以上	45 × 3 以上	60 × 4.5(89) 以上
		土中埋込	1,45			
高速自動車国道等	90	コンクリート	1,175	34 × 1.6 以上	34 × 2 以上	60 × 3.5 以上
	120	コンクリート	1,525			

■ 色彩

反射体の色は白色，橙色の 2 色とし，次に示す色度範囲にあるものとする．

$$
\text{白色} \quad \begin{cases} 0.31 + 0.25x \geqq y \geqq 0.28 + 0.25 \\ 0.50x \geqq 0.41 \end{cases}
$$

$$
\text{橙色} \quad \begin{cases} 0.44 \geqq y \geqq 0.39 \\ y \geqq 0.99 - x \end{cases}
$$

x，y は JIS Z8701 の色度座標である．一般に，白色の使用が普通であり，橙色は道路の右側及び分離帯等，または危険 (特別) な区間を示す必要がある場合に使用する．橙色は白色に対し反射光率は悪いが，一般的に「注意」の意味で用いられるため，この基準でも同様の意味を持たせている．ここでの白色は，入射光をそのままの色光で反射するという意味で反射体としては無色透明である．

■ 反射性能

反射体の反射性能は，JIS D 5500 に規定する反射性試験装置による試験結果が表 6.2 に示す値以上である必要がある．反射体と自動車の前照灯及び運転者の目の位置の幾何学的な関係を図 6.6 に示

表 6.2: 反射性能 [cd/10.76 lx]

観測角	白色			橙色		
	0°	10°	20°	0°	10°	20°
0.2°	35	28	21	22	18	13
0.5°	17	14	10	11	9	6
1.5°	0.55	0.44	0.33	0.34	0.28	0.20

す．観測角とは運転者の視線と前照灯から反射体に入射する光線とのなす角度であり，入射角とは前照灯から反射体に入射する光線と反射体の表面にたてた法線とのなす角度である．運転者は道路端

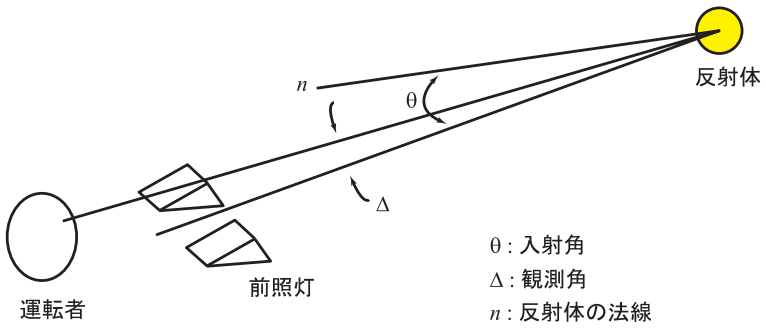


図 6.6: 反射体と運転者等との関係

に設置された視線誘導標に向かい走行するが，次第に接近してやがてその側方を通過する．この間，反射体に対する入射角は線形の関係によって広範囲に変化する可能性があるが観測角は比較的小さい範囲にとどまる．このような，幾何学的条件の変化に対し，反射体は常に均等な輝度で輝き，きらめいたり，接近して急に輝いたりすることがないことが必要である．すなわち，広範囲な入射角の変化と，小さい観測角において常に十分な反射光量を保持することが反射体に必要な光学的性質である．

6.3.2 設置計画

■ 設置区間

視線誘導標にあたっては，当該道路の構造，交通の状況から総合的に検討し，必要に応じて設置する．設置の目安には，以下に示すものが考えられる．

1. 設計速度が 50 km/h 以上の区間
2. 車線数や車道幅員が変化する区間
3. 急カーブ及び急カーブに接続する区間

ただし，道路照明その他の施設等により視線誘導が十分な区間では省略することができる．

■ 設置方法

視線誘導標の設置場所は，左側路側を原則とし，必要に応じて中央分離帯及び右側路側等にも設置するものとする．また，視線誘導標の反射体の色，個数及び大きさについては表 6.3 に示す．

表 6.3: 反射体の色，個数及び大きさ

視線誘導標の設置場所	反射体		
	色	個数	大きさ (直径) [mm]
左側路側	白色	単眼	70 ～ 100
中央分離帯及び右側路側等	橙色	単眼	70 ～ 100

■ 設置間隔

視線誘導標は連続して設置する．しかし，等間隔で設置した場合，平面曲線半径が小さい区間では，視線誘導標相互の間隔が視覚的に広く見えるため，滑らかに視線が誘導されず効果が低下する．そのため，平面線形に関係なく視覚的に一定の間隔で視線誘導標が見えるように，視線誘導標相互の標準設置間隔 (S) は道路の曲線半径 (R) に応じ，次式により求めた表 6.4 に示す値とする．

$$S = 1.1\sqrt{R - 15} \tag{6.6}$$

表 6.4: 標準設置間隔 [m]

曲線半径	設置間隔
～ 50	5.0
51 ～ 80	7.5
81 ～ 125	10.0
126 ～ 180	12.5
181 ～ 245	15.0
246 ～ 320	17.5
321 ～ 405	20.0
406 ～ 500	22.5
501 ～ 650	25.0
651 ～ 900	30.0
901 ～ 1200	35.0
1201 ～	40.0

6.4 視線誘導標の検出

夜間の視線誘導標は自動車の前照灯からの光を反射し，輝度が高い円形状として観測される．そこで，円検出により視線誘導標の大きさと画像座標を求める．従来，円検出には円形 Hough 変換が用いられている．Hough 変換ではエッジ点を中心にして投票することにより円形状の中心と半径を得ることができる．しかし，視線誘導標は 100 m 先から見えるため，画像上では 3 pixel と小さく，エッジを抽出することが困難な場合がある．そこで，円形状に施した際にその特徴がより表れる正規分布を基にしたフィルタを作成する．

6.4.1 円検出フィルタ

円形状を検出するフィルタには，次式に示す正規分布を利用する．

$$G(p,q) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{p^2+q^2}{2\sigma^2}\right) \tag{6.7}$$

反射光の半径を r としたとき，フィルタを以下の式で定義する．

$$F(p,q) = G(p,q) - \frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \tag{6.8}$$

次に r を変化させたときの最大の応答値が一定となるように正規化を行う．

$$Filter(p,q) = \begin{cases} \frac{F(p,q)}{m_+} & \text{if} \quad F(p,q) > 0 \\ \frac{F(p,q)}{m_-} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{6.9}$$

m_+ が正の値の総和，m_- を負の値の総和とする．このフィルタを半径 r の円形状にかけたとき，円形状の中心で高い応答を得ることができ，円形状の周辺ではマイナスの応答となる．任意の半径 r としたフィルタを複数作成し，画像に施すことにより大きさの異なる反射光を検出する．

図 6.7 に直径 15，9，3 pixel のフィルタの例を示す．また，図 6.8(a) の直径 15，9，3 pixel にフィルタリングした際の線上の応答を図 6.8(b) に示す．図 6.8(b) より，視線誘導標と同一サイズの幅を持つフィルタをかけたとき，最大の応答を得ることができ，その両端にはマイナスの応答が発生している．これらの応答の関係を用いることにより，視線誘導標の中心位置の検出と 3 種類の幅に識別することが可能となる．

6.4.2 反射光の中心検出

画像中に存在する視線誘導標は近距離 (約 20 m) のものから遠距離 (約 100 m) のものまで存在し，距離毎に画像中の大きさは異なる．視線誘導標の位置が近距離の場合，直径が約 15 pixel，遠距離で約 1∼3 pixel と観測されるため，本手法では，フィルタのサイズを直径 15，9，3 pixel の 3 種類と

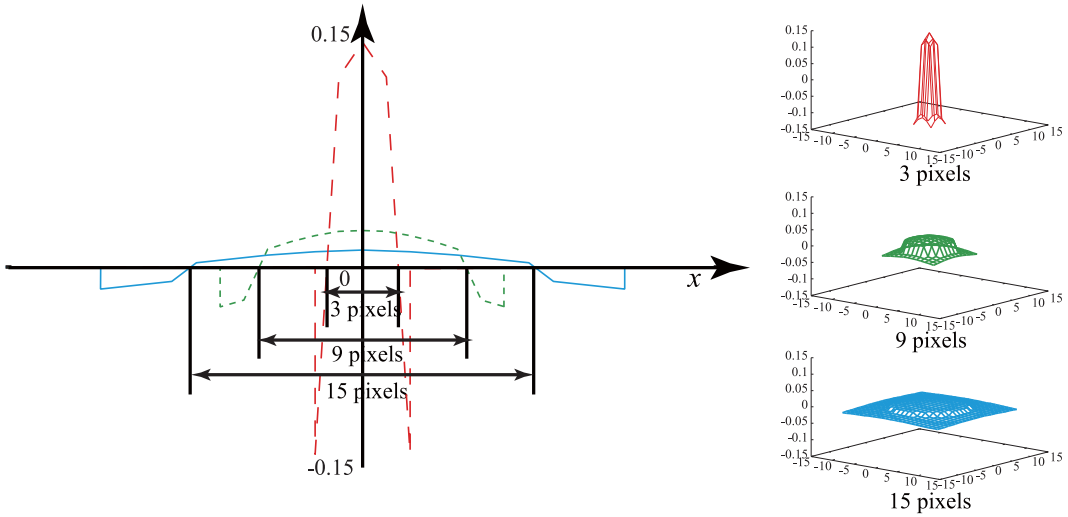


図 6.7: 3 種類のフィルタ例

し，直径 15 pixel から順に式 (6.9) によるフィルタを施す．最小のフィルタの直径を 1 pixel にしない理由は，ノイズが多く検出されてしまう可能性があるためである．以下に反射光の半径毎のフィルタを用いて中心を算出する手順を示す．

Step1 フィルタを適用

Step2 応答が 0 以上ある点を探索

Step3 円形状の中心の応答値が最大となるため，Step2 で求めた点から，応答値が最大となる点を探索

Step4 Step3 で求めた点を円形状の中心とし，フィルタの半径内で 0 以上となる応答の断面図を算出し，この断面図の形が円形状に近い場合，その点は円形状の中心であると決定

以上の処理を複数のフィルタと画像全体にラスタスキャンを行い，全フィルタ結果で最も高い応答値を持つ位置が視線誘導標の中心となり，そのときのフィルタの大きさが視線誘導標の大きさとして出力される．

6.4.3 3 次元位置推定

算出した視線誘導標の画像座標からステレオ視を用いて 3 次元位置を算出する．ステレオ視で 3 次元位置を求めるためには，2 台のカメラの対応点を取得する必要がある．しかし，視線誘導標の未検出や誤検出により一意に対応付けを行うことができない．そこで，エピポーラ拘束と視線誘導標の検出結果を利用して対応点探索を行う．これらの対応点を用いて視線誘導標の 3 次元位置を算出する．

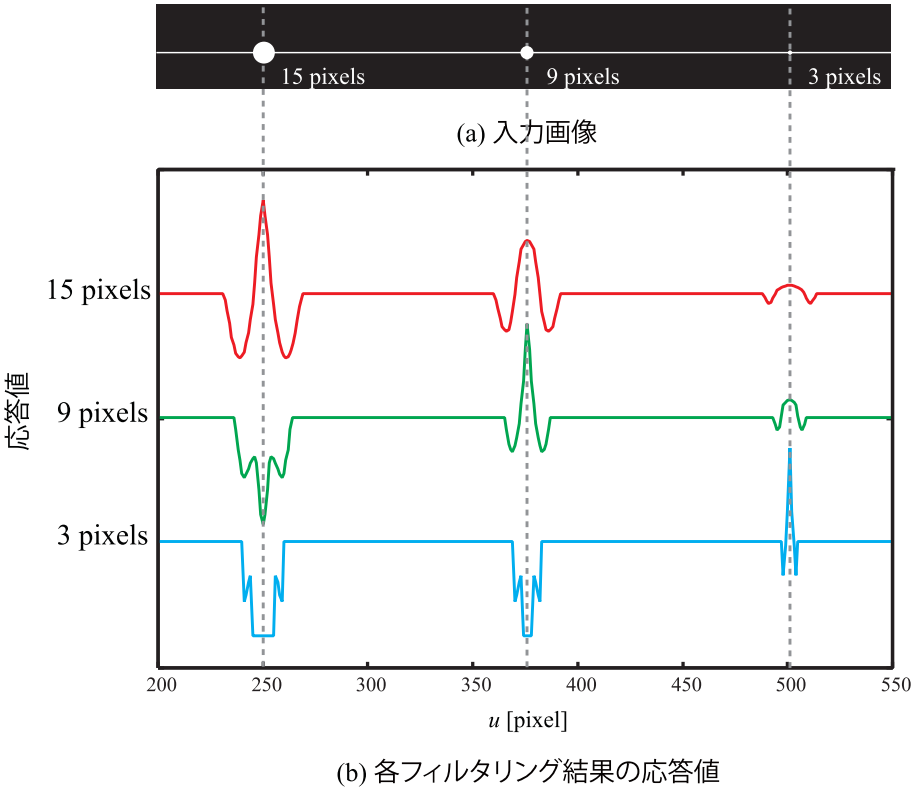


図 6.8: 視線誘導標のモデルと応答値

6.5 道路構造の推定

本節では，**6.4.3** によって求められた視線誘導標の 3 次元位置を用いて，道路構造の認識を行う．視線誘導標から道路構造の認識を行うために，道路の構造を考慮した手法が適切であると考えられる．そこで，道路を設計する際に用いられるクロソイド曲線を視線誘導標の 3 次元位置に当てはめることにより道路構造の認識を行う．クロソイド曲線を当てはめる際に得られる曲線のパラメータから SVM(Support Vector Machine)[53] により 4 種類のカーブに分類する．本論文では，対象とするカーブを右カーブ，左カーブ，右カーブから左カーブ (以下右左カーブ)，左カーブから右カーブ (以下左右カーブ) の 4 種類とし，これらのカーブに分類することを目的とする．

次節では，使用する座標系について述べ，その後クロソイド曲線と 3 次関数により視線誘導標モデルを定義し，最後に道路構造を認識する手法について述べる．

6.5.1 座標系の定義

本手法で用いる座標系の種類とその定義を図 6.9 に示す．

世界座標系 世界座標系は時刻変化に影響しない一定の原点を持ち，x_w, y_w, h_w とする．

車両座標系 車両座標系は時刻毎に変化し，車両の向いている方向を y 軸とし，x_v, y_v, h_v とする．世界座標系から車両座標系へは回転行列 $\boldsymbol{R}_{wv}$，平行移動ベクトル $\boldsymbol{T}_{wv}$ を用いて変換する．この回転行列と平行移動ベクトルは，ego-motion やジャイロなどを使用することにより求める．

カメラ座標系 カメラ座標系は時刻毎に変化し，カメラの光線を y 軸とし，x_c, y_c, h_c とする．車両座標系とカメラ座標系の関係を表す回転行列 $\boldsymbol{R}_{vc}$ と平行移動ベクトル $\boldsymbol{T}_{vc}$ はキャリブレーションを行うことにより求められ，座標系の変換が可能となる．

視線誘導標座標系 視線誘導標座標系は時刻毎に変化し，視線誘導標に沿う y 軸をとる座標系であり，x_d, y_d, h_d とする．

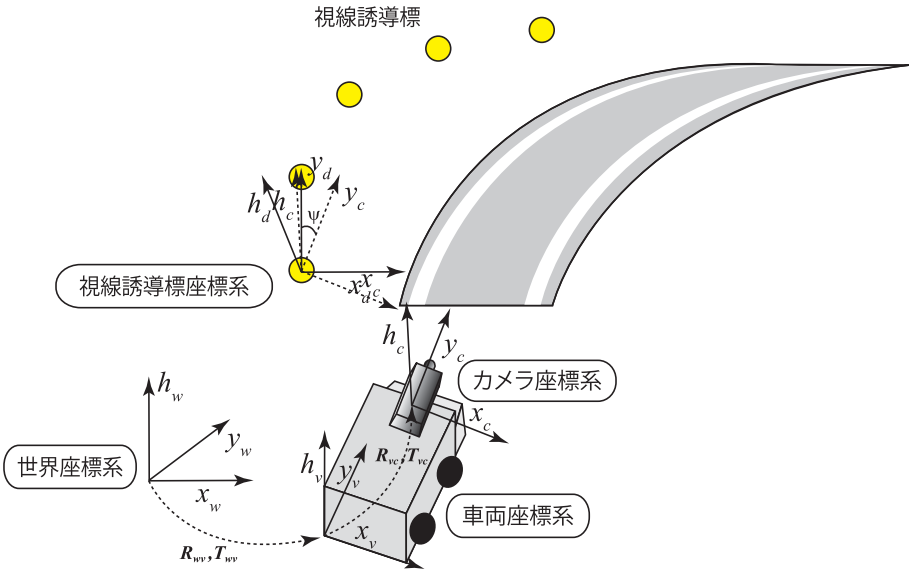


図 6.9: 座標系の定義

6.5.2 視線誘導標モデルの定義

視線誘導標を結ぶ曲線を以下の式で定義する．

$$x = x(s), \quad y = y(s), \quad h = h(s) \tag{6.10}$$

s は媒介変数である．このとき，

$$\begin{cases} x(s) := x_0 + x_1 \frac{s^2}{2} + x_2 \frac{s^3}{6} \\ y(s) := s \end{cases} \tag{6.11}$$

x_1 は x 軸の曲率変数, x_2 は x 軸の曲率変化率と定義し，x 方向と y 方向の変化はクロソイド曲線に従うとする．また，高さ方向の変化 $h(s)$ を 3 次関数と近似できるものとする．

$$h(s) := h_0 + h_1 s + h_2 \frac{s^2}{2} + h_3 \frac{s^3}{6} \tag{6.12}$$

本研究では視線誘導標の 3 次元位置が得られたときに，$x(s)$，$y(s)$，$h(s)$ を求めることを考える問題である．

6.5.3 手法の流れ

本手法で得られるデータは視線誘導標の 3 次元座標であるので，その 3 次元位置をクロソイド曲線と 3 次関数に当てはめる．得られたパラメータより道路の構造解析を行う．以下にその手法について示す．

Step 1 視線誘導標座標系に変換

媒介変数 s は， $y(s) = s$ の関係があり，自動車が実際に走行する際の変化量となり，ユークリッド距離で表現される．視線誘導標が直線の場合は，ユークリッド距離と $y_c(i)$ が同等であるため問題がない．しかし，曲がっている場合には，ユークリッド距離と $y_c(i)$ との間にずれが生じるため誤差が発生する．そこで，クロソイド曲線を当てはめる際に，図 6.9 のようにより視線誘導標に沿う軸に変換する．カメラ座標系から視線誘導標座標系への平行移動ベクトル $\boldsymbol{T}_c$ と回転角 ψ を得ることにより s 軸の近似を行う．このとき，各 3 次元座標は以下の式で変換される．

$$\boldsymbol{X}_d = \boldsymbol{X}_c \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \boldsymbol{T}_c \tag{6.13}$$

$\boldsymbol{X}_d = [x_d\ y_d\ h_d]$ は座標変換後の 3 次元位置，$\boldsymbol{X}_c = [x_c\ y_c\ h_c]$ はカメラ座標の 3 次元位置である．このとき，ψ と $\boldsymbol{T}_c$ は以下のように求める．

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{x_c(0)}{y_c(0)}\right), \quad \boldsymbol{T}_c = [x_c(0)\ y_c(0)\ h_c(0)]$$

Step 2 各パラメータの算出

求めた 3 次元位置を用いて，クロソイド曲線と 3 次関数を当てはめる．

(a) 媒介変数 s の算出

設計するカーブは道路面上に適用されるため，坂や勾配がある場合，2 次元平面に正射影したカーブは，設計した際のカーブとは異なったものとなる．したがって，式 (6.11) における媒介変数 s は各 3 次元位置間の変化量で表わす必要がある．そこで，以下の式により視線誘導標座標系におけるユークリッド距離から媒介変数 s を決定する．

$$
\begin{aligned}
s_0 &= ||\boldsymbol{X}_d(0)|| && (6.14)\\
\Delta s_{i,i-1} &= ||\boldsymbol{X}_d(i) - \boldsymbol{X}_d(i-1)|| && (6.15)\\
s_i &= s_{i-1} + \Delta s_{i,i-1} \quad (i = 1, 2, 3 \cdots n)
\end{aligned}
$$

(b) クロソイド曲線による当てはめ

視線誘導標の 3 次元位置に LM(Levenberg-Marquardt) 法を用いて式 (6.11) のクロソイド曲線を当てはめる．しかし，検出した視線誘導標にはアウトライヤが存在するため RANSAC[54] を用いて，クロソイド曲線のパラメータを推定する．この当てはめより，カーブの曲がり方を決定するクロソイド曲線のパラメータ x_0，x_1，x_2 を得ることができる．

(c) 3 次関数による当てはめ

(b) と同様に，視線誘導標の 3 次元位置に LM 法と RANSAC を用いて 3 次関数を当てはめる．この当てはめ結果により，道路の起伏を決定する 3 次関数のパラメータ h_1，h_2，h_3 を得ることができる．

Step 3 カーブの分類

クロソイド曲線のパラメータ x_1 と x_2 を予め学習しておいた SVM に入力し，カーブを 4 種類に分類する．

以上の処理を行うことにより，道路構造の認識を行う．

6.5.4 Support Vector Machine(SVM) の学習

学習で用いるクロソイド曲線のパラメータの分布を図 6.10 に示す．図 6.10 より，このクロソイド曲線のパラメータ x_1，x_2 から線形な閾値処理により，直線と 4 種類のカーブに識別することは難しい．そこで，非線形な識別が可能である SVM[53] を用いて学習を行う．

マルチクラス SVM 識別器を構築するには，予め学習が必要である．本手法では，シミュレーション空間上に作成したカーブから学習データを作成する．カーブに対して，視線誘導標を設置し，そこにクロソイド曲線を当てはめることによりパラメータ x_1，x_2 を算出する．この処理を右カーブ，左カーブに対して行う．また，右左カーブや左右カーブは，この右と左のカーブを繋ぐことにより作成し，クロソイド曲線のパラメータを求める．そして，求めたパラメータと正解データを合わせ，教師付き学習を行う．右カーブと左カーブの遷移の間には直線もあることを考え，直線についても学習を行う．

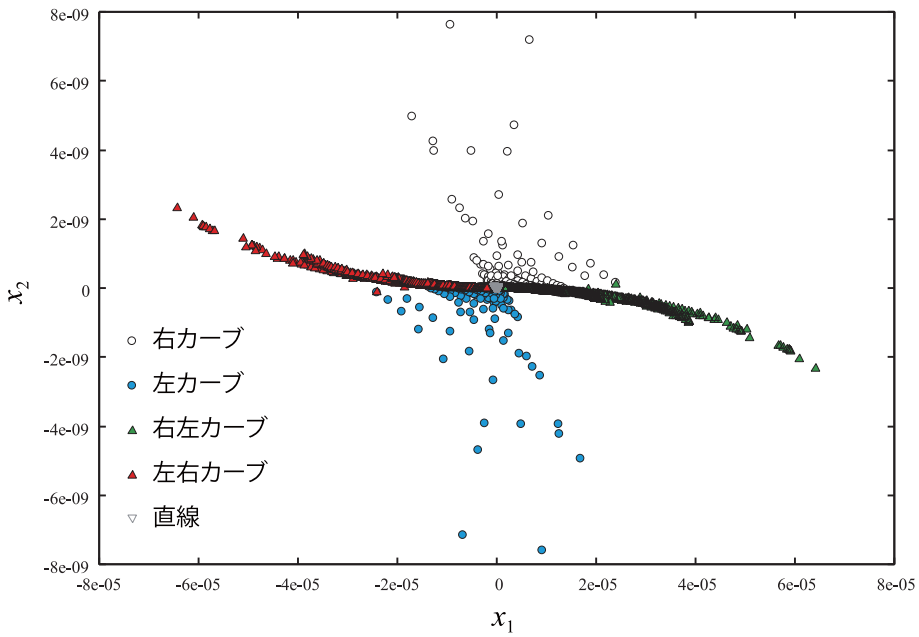


図 6.10: クロソイド曲線のパラメータマップ

6.6 視線誘導標の検出実験

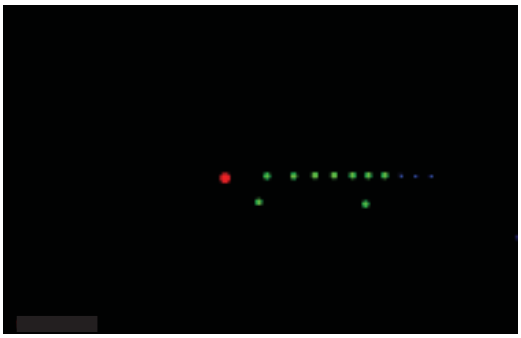
車載カメラから夜間の視線誘導標を撮影し，視線誘導標を検出する．従来法の円形 Hough 変換と提案する円検出フィルタによる円検出精度の比較を行う．カメラは解像度 752x480，水平画角 24 度，焦点距離 5 mm，10 fps のものを使用する．シーケンスは右カーブ，左カーブを含む 300 フレームであり，シーン中には，視線誘導標，道路標識，白線，破線，ガードレールが主に存在する．このとき画像中に出現する視線誘導標の総数は 2,298 個である．円形 Hough 変換に必要なエッジは Canny オペレータを使用することで算出する．図 6.11(a) の入力画像に対し，本手法と円形 Hough 変換で円形状を抽出した結果を図 6.11(b)(c) に示す．それぞれ検出に用いたフィルタの直径は 15，9，3 pixel の 3 種類である．提案手法の検出結果を見ると，道路の破線上に誤検出が発生している．しかし，遠方の小さな視線誘導標まで検出可能であることが分かる．一方，従来手法である円形 Hough 変換の検出結果は，白線部分にエッジが残っているため誤検出が多く発生する．

提案手法の検出精度を評価するために，正解率，誤検出率，未検出率を算出する．検出した円形状の正解数を C，誤検出した数を fp，未検出の数を fn として以下の式で正解率，誤検出率，未検出率を計算する．

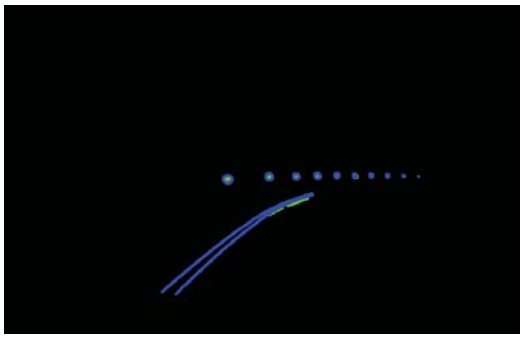
$$\text{正解率} = \frac{C}{C + fn} \times 100 \tag{6.16}$$

$$\text{誤検出率} = \frac{fp}{C + fp} \times 100 \tag{6.17}$$

(a) 入力画像



(b) 提案手法



(c) 円形 Hough 変換

図 6.11: 視線誘導標の検出例

表 6.5 に視線誘導標の検出精度を示す．視線誘導標の検出率の平均は 95.4 % と高い精度を得ることができた．9 pixel の正解率が最も低い理由は，カーブ時に視線誘導標同士が重なるシーンが発生するためである．重なった視線誘導標は，大きく見えるため 15 pixel の視線誘導標として検出される場合がある．また，誤検出率は 18.5 % であった．フィルタのサイズが 9 pixel のときに最も誤検出率が大きく 29.3 % となった．破線が遠方にある場合に視線誘導標の形状と酷似するため，9 pixel の視線誘導標であると検出された．また，円形の道路標識や視線誘導標を設置してあるポールも誤検出とされた．このような誤検出が発生するが，クロソイド曲線を当てはめる際に RANSAC を用いることでアウトライヤとして除去することが可能である．

また，対向車の前照灯は光を発しているため，誤検出の対象となりやすいと考えられる．図 6.12 に対向車の前照灯を含んだ際の検出例を示す．このシーンでは，前照灯の光は光の中心が一番強い光を放ち，その周辺に拡散したようにぼんやりとした光が大きく広がっている．そのため，視線誘導標と光の分布が違うため，誤検出が発生しないと考えられる．一方，遠方に対向車がある場合は，全体的に光の輪が小さくなるため，誤検出が発生する．しかし，この誤検出は前述した様にアウトライヤとして除去することが可能である．

図 6.13 に各大きさの視線誘導標を採取し，平均輝度を算出した分布とその輝度分布に提案手法の

表 6.5: 視線誘導標の検出精度 [%]

フィルタサイズ	正解	誤検出	未検出
15	99.2	7.6	0.8
9	92.1	29.3	7.9
3	98.6	3.7	1.4
平均	95.4	18.5	4.6

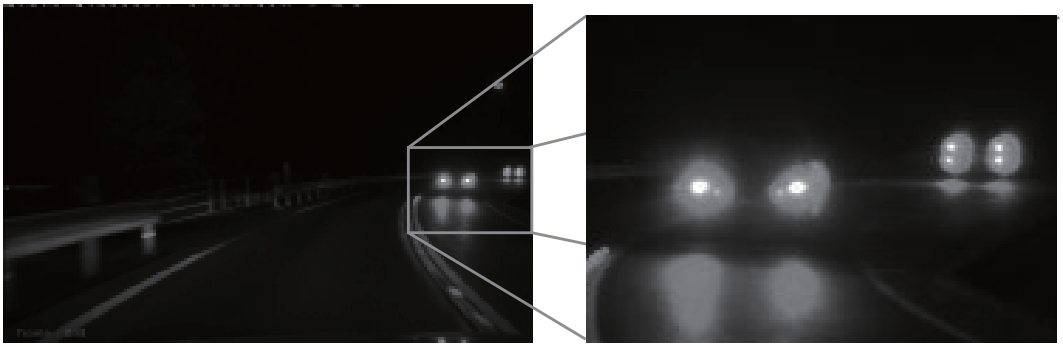


図 6.12: ヘッドライトのあるシーンでの視線誘導標の検出

フィルタを施した際の応答値を示す．各最大応答値は一定ではないが，視線誘導標の大きさと同じフィルタを施した際に最大値を示すことがわかる．したがって，提案手法による円検出フィルタは，輝度の強度が変化した場合でも，円形状であれば検出することが可能である．

6.7 道路構造の認識実験

実際の車載カメラを用いたカーブの方向を検出する実験では，評価を行う際に，車から視線誘導標までの距離の真値やカーブの曲率などを正確に知ることができない．また，多くの評価データを収集することも困難である．そこで，シミュレーション空間上に仮想道路を作成することにより評価を行う．

6.7.1 視線誘導標への当てはめ精度

提案手法は，視線誘導標の 3 次元位置にクロソイド曲線を当てはめることで道路構造の認識を行うため，曲線の当てはめは重要な処理である．そこで，提案手法の有効性を示すため，曲線半径 15，30，60，100，150，280，460，710 m(視線誘導標の設置間隔を基準に決定) を持つ右，左カーブとそれを組み合わせた右左，左右カーブに曲線を当てはめ，その誤差を算出し評価する．視線誘導標

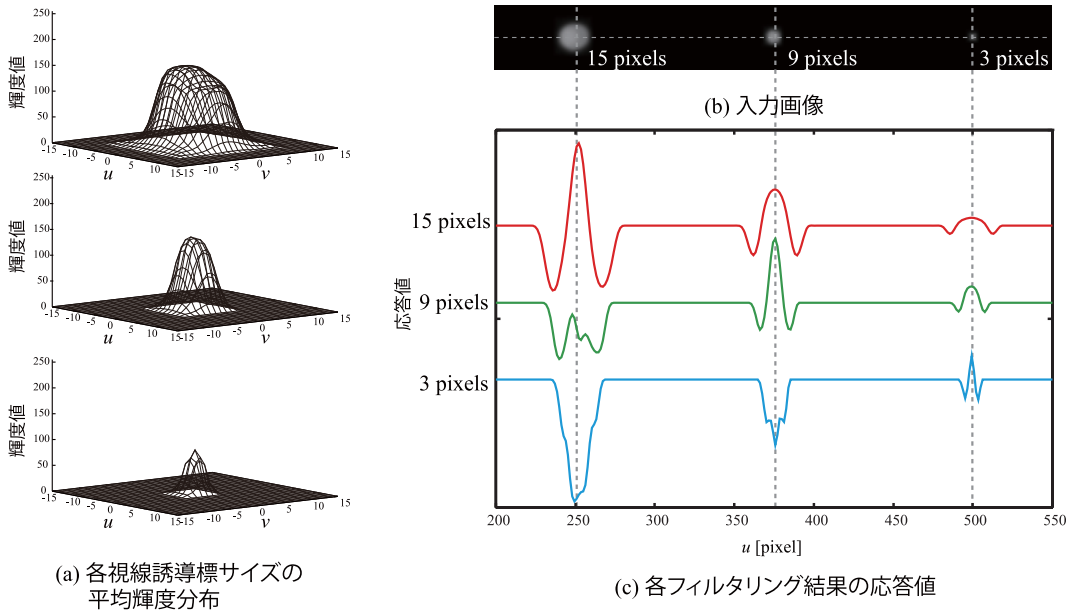


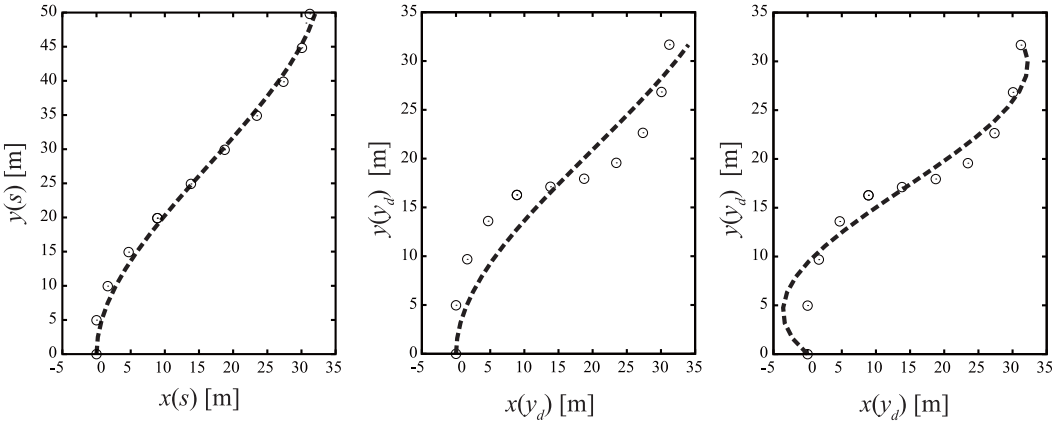
図 6.13: 各視線誘導標サイズの平均輝度分布と応答値

の 3 次元位置 $\boldsymbol{X}_d = [x_d\ y_d\ h_d]$ を xy 平面に投影した座標，すなわち式 (6.18) に示す媒介変数 $s = y_d$ とした際の当てはめ (以下 fitting2) と式 (6.19) の 3 次関数による当てはめ (以下 fitting3) を比較対象とする．

$$\text{fitting2} \quad \begin{cases} x(s) := x_0 + x_1 \frac{s^2}{2} + x_2 \frac{s^3}{6} \\ y(s) := s \end{cases} \tag{6.18}$$

$$\text{fitting3} \quad \begin{cases} x(y_d) := x_0 + x_1 y_d + x_2 y_d^2 + x_3 y_d^3 \\ y(y_d) := y_d \end{cases} \tag{6.19}$$

平均当てはめ誤差は，提案手法において 9.2 m，fitting2 は 36.1 m，fitting3 は 25.0 m となり，提案手法による当てはめは，他手法より平均誤差を 50 % 以上減らすことができるため，当てはめ精度が高いことがわかる．また，3 次関数はクロソイド曲線に比べ自由度が高いため，fitting2 より fitting3 の平均当てはめ誤差が小さくなると考えられる．しかし，fitting3 の当てはめは，図 6.14 の S 字カーブへの当てはめ例を見てわかるように，最初の右カーブで左にカーブしており，カーブに適した当てはめが行われていない．一方，提案手法では，S 字カーブへの当てはめが精度よく行えていることがわかる．以上のことから，提案手法のクロソイド曲線の当てはめは，平均当てはめ精度が高く，カーブに適した当てはめが可能であるといえる．



(a) Proposed method (b) fitting2 (c) fitting3

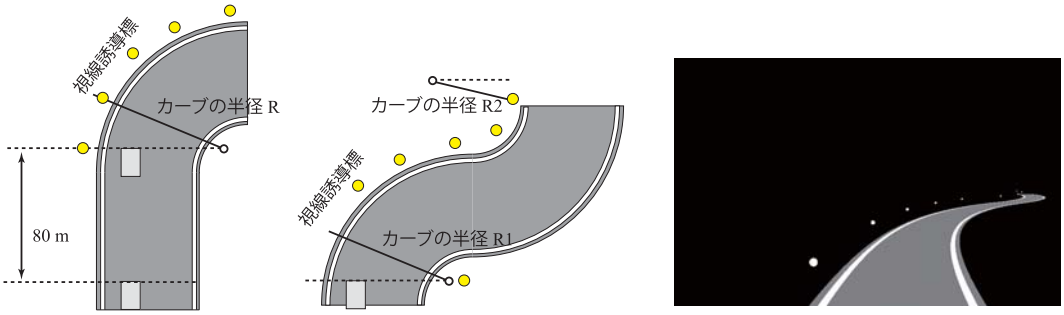
図 6.14: 各曲線の当てはめ例

6.7.2 仮想道路画像の作成

図 6.15 に評価に用いた仮想道路の設計例を示す．曲線半径毎に決められた視線誘導標の設置間隔 [52] に基づき視線誘導標を配置し，実際のカメラの FOV や焦点距離を基に仮想道路の CG 画像を作成する．以下に右カーブ，左カーブを作成する際の条件を示す．

- 曲線半径 R:40 ∼ 900 [m]
- CG 画像解像度
  - 752x480 [pixel]
  - 1920x1080 [pixel]
- 自車 (カメラ) 位置
  - カーブ入り口の手前 80 m から 20 m おきに 0 m まで移動
  - 視線誘導標の数が 3 以上のシーンのみ採用

同様に，右左カーブ，左右カーブの評価用シーンの作成を行う．右左カーブ，左右カーブは手前のカーブと遠方のカーブが見えている必要があるため，自車 (カメラ) 位置は 0 m で固定とし，カーブの曲線半径を 40 ∼150 m とし，10 m 間隔で設定した曲線半径を組み合わせたものとする．評価シーン数として，右カーブ，左カーブは 270 枚の画像を，右左カーブ，左右カーブでは 288 枚の画像を作成した．図 6.15(c) に作成した画像例を示す．



(a) カーブ　(b)S字カーブ　(c) CGで作成した画像

図 6.15: 評価シーン

6.7.3 道路構造認識

シミュレーション空間上の視線誘導標の 3 次元位置はベースラインを 40 cm としたステレオ視で求め，この 3 次元位置を用いてクロソイド曲線を当てはめることにより，カーブの分類を行う．

表 6.6 に入力画像の解像度を 752x480 pixel とした際のカーブの分類率を示す．表 6.6 から，すべてのカーブにおいて，75 % 以上の精度でカーブを分類することができている．右カーブでは，右左カーブへの誤分類が多く，左カーブでは，左右カーブへの誤分類が多く発生していることがわかる．これは，右左カーブは第一カーブが右へ曲がり，左右カーブは第一カーブが左に曲がることにより，右カーブや左カーブとの識別境界に近くにパラメータが発生することが原因であると考えられる．また，誤分類の原因の一つとして，ステレオ視で 3 次元位置を求める際の精度が考えられる．

表 6.6: 分類精度 (752x480 pixel)[%].

	右	左	右左	左右	直線	正解数	[%]
右カーブ	253	7	2	7	1	253	93.7
左カーブ	8	249	9	4	0	249	92.2
右左カーブ	49	4	217	18	0	217	75.3
左右カーブ	20	14	5	249	0	249	86.4
合計 & 平均						968	86.9

■ ステレオ視の精度と分類精度

図 6.16 にステレオ視の誤差の算出概念図を示し，誤差を算出する際には，幾つかの条件が必要であるため，既存のカメラの情報からその条件を決定し算出する．以下にその条件を示す．

- ベースライン: 40 cm
- 解像度: 752 x 480 pixel
- 水平・垂直解像度: 0.006 mm/pixel
- 焦点距離: 5 mm
- 画角 (FOV:Field Of View): 0.84 rad (= 48.5 degree)
  画角 θ [rad] は焦点距離 f [mm] と画像サイズ D [mm] から次のように計算することができる．

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{D/2}{f} \tag{6.20}$$

焦点距離は $f = 5$ mm，画像サイズは $D = 752 \times 0.006 = 4.512$ mm であるから画角は以下のようになる．

$$\theta = 2\tan^{-1}\left(\frac{4.512/2}{5}\right) \tag{6.21}$$

$$= 0.84 \text{ rad} \tag{6.22}$$

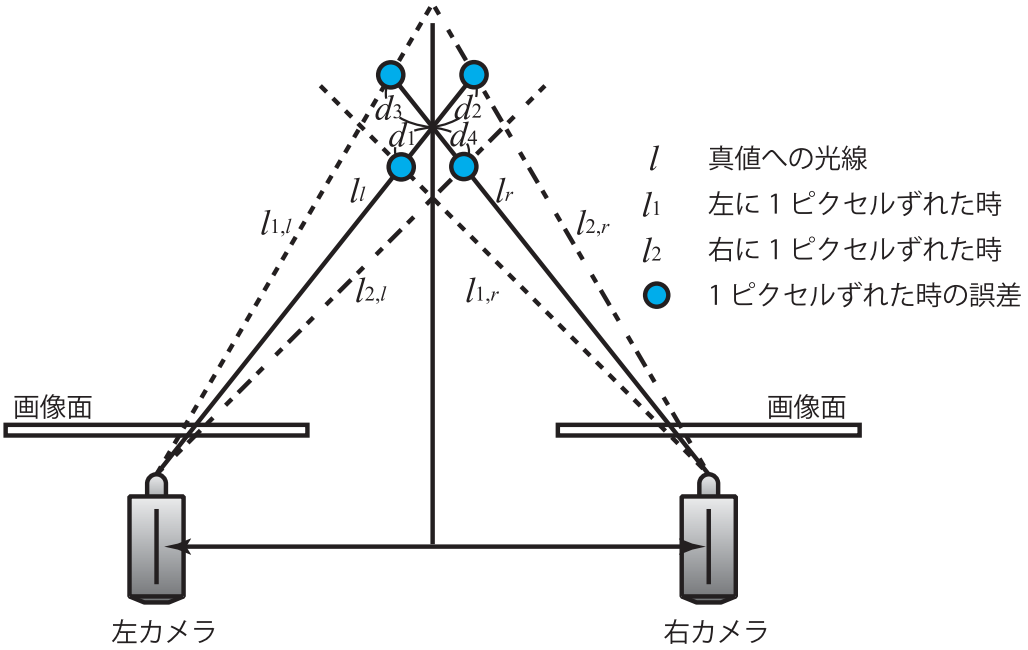


図 6.16: 誤差の算出

図 6.16 の l_c は真値に向かう光線であり，$l_{1,c}$ はそれぞれの画像中で 1 ピクセル左にずれたときの光線であり，さらに，$l_{2,c}$ はそれぞれの画像中で 1 ピクセル右にずれたときの光線である (c はカメラを

表し，l か r である)．このときの 1 ピクセルは，画像上での単位であるので，誤差を算出し，光線を求める際には，世界座標系に変換を行う必要がある．条件にも書いたように，水平・垂直解像度から，画像平面が世界空間上で何 mm であるかを知ることができる．水平・垂直解像度 0.006 mm/pixel であるから，1 ピクセルは 0.006 mm に相当する．誤差を求める対象は，l_l と $l_{1,r}$ の交点と l_l と $l_{2,r}$ の交点と l_r と $l_{1,l}$ の交点と l_r と $l_{2,l}$ の交点の計 4 点となる．この交点と真値のユークリッド距離の平均を誤差とする．

図 6.17 に視線誘導標の設置範囲毎のカーブの分類率とステレオ視により発生する誤差の関係を示す．棒グラフは分類精度を示し，上部に視線誘導標の分布範囲が表示してある．また，折れ線グラフは，横軸を奥行きとしてステレオ視の 1 pixel 当たりの誤差を各カメラの解像度で算出したグラフである．図 6.17 から，視線誘導標の分布が近いシーンでは，ステレオ視の精度が高く，安定してカーブを分類できている．また，視線誘導標の距離が遠いシーン，すなわちステレオ視での精度が低いときには正解率が落ちていることがわかる．これを改善するためには，カメラの解像度を高くすることや，ベースラインを広くすることが考えられる．表 6.7 に入力画像の解像度を 1920x1080 pixel としたときのカーブの分類率を示す．すべてのカーブにおいて，90 % 以上と高い精度でカーブを分類することができている．したがって，解像度を高くすることにより，3 次元位置推定の精度が向上し，カーブの分類精度を向上させることが可能となる．

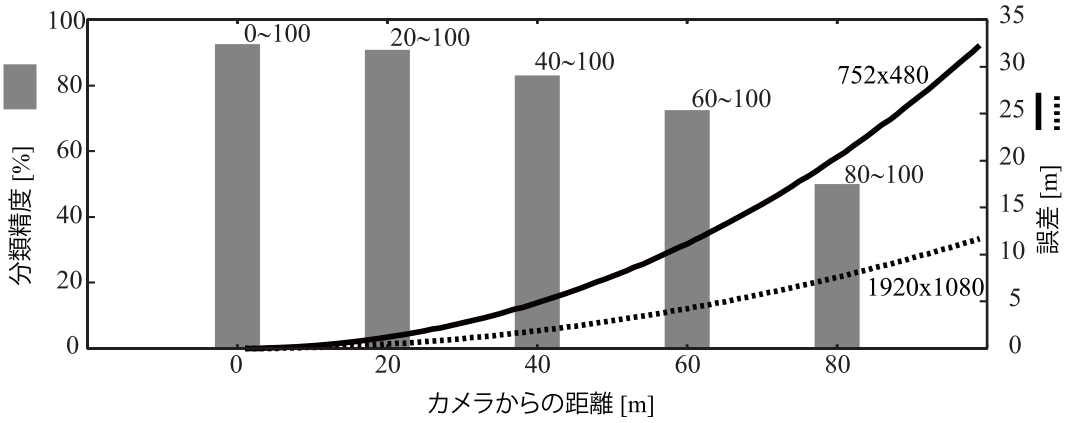


図 6.17: 精度とステレオ視の誤差の関係

■ 他手法との比較

クロソイド曲線の媒介変数を $s = y_d$ とした際の当てはめにより求められたパラメータを用いたカーブ分類手法 (以下 method2) と，3 次関数による当てはめにより求められたパラメータを用いたカーブ分類手法 (以下 method3) を提案手法と比較する．入力画像は 752x480 pixel の解像度として，ステレオ視で求めた 3 次元位置を使用し，各当てはめを行い SVM への入力パラメータを算出する．

表 6.7: 分類精度 (1920x1080 pixel)[%].

	右	左	右左	左右	直線	正解数	[%]
右カーブ	260	0	1	9	0	265	96.3
左カーブ	2	251	17	0	0	251	93.0
右左カーブ	7	8	273	0	0	273	94.7
左右カーブ	18	6	0	264	0	264	91.6
合計 & 平均						1048	93.9

method2 の入力パラメータは提案手法と同じ 2 パラメータであり，method3 は 3 次関数であるため 3 パラメータとなる．method2 のカーブの分類率は 47.8 %，fitting3 は 27.9 %であり，提案手法の 86.9 %より低い正解率となった．method2 の分類率が悪い原因は図 6.18 に示すように，method2 で SVM 識別器を構築する際に使用したパラメータの分布が提案手法のパラメータの分布 (図 6.10) に比べ，各カーブのパラメータの重なりが多いことが挙げられる．SVM では，クラス間で重なりがある場合でも，学習を行うことが可能であるが，観測誤差を含むような入力値を正しく分類するとは限らない．そのため，学習が行えたとしても，重なりの高い method2 では観測誤差を含む入力値に対応することが難しく，分類率が低くなったと考えられる．一方，提案手法では，図 6.10 に示すように各カーブのパラメータの重なりが少なく，SVM を使用することでより良い識別境界が作成されるため，精度がよくなると考えられる．method3 の分類率が低い原因として，3 パラメータを用いた SVM 識別器の構築の失敗が考えられる．しかし，提案手法でも同様に SVM 識別器を構築しているため，提案手法における SVM 識別器の構築の容易さがわかる．また，3 次関数は視線誘導標に当てはめる際に，カーブにあった当てはめが行われていないことも分類率が低い原因であると考えられる．

■ 頑健性の評価

最後に提案手法の頑健性を示すため，誤検出が発生した際の分類精度を検証する．誤検出は，視線誘導標付近のガードレールやポールに多く発生するため，本実験におけるノイズも視線誘導標付近に発生させる．分類に使用する右カーブ，左カーブの視線誘導標の平均数が約 5 個であるので，ノイズの数を 0 から 5 に変化させた際の分類率を算出する．表 6.8 に分類率を示す．全てのカーブの分類精度はノイズが 5 の場合でも，約 70 %の分類精度を得ることができた．したがって，ノイズを含むシーンにおいてもカーブを認識することが可能であると言える．

6.7.4 車載カメラを用いた実験

図 6.19 に二つのシーンでの車載カメラ (FULL HD) から取得した画像を示す．この 2 枚の画像はベースラインが約 40 cm でカメラを車に設置し，視線誘導標を撮影したものである．これらのカメ

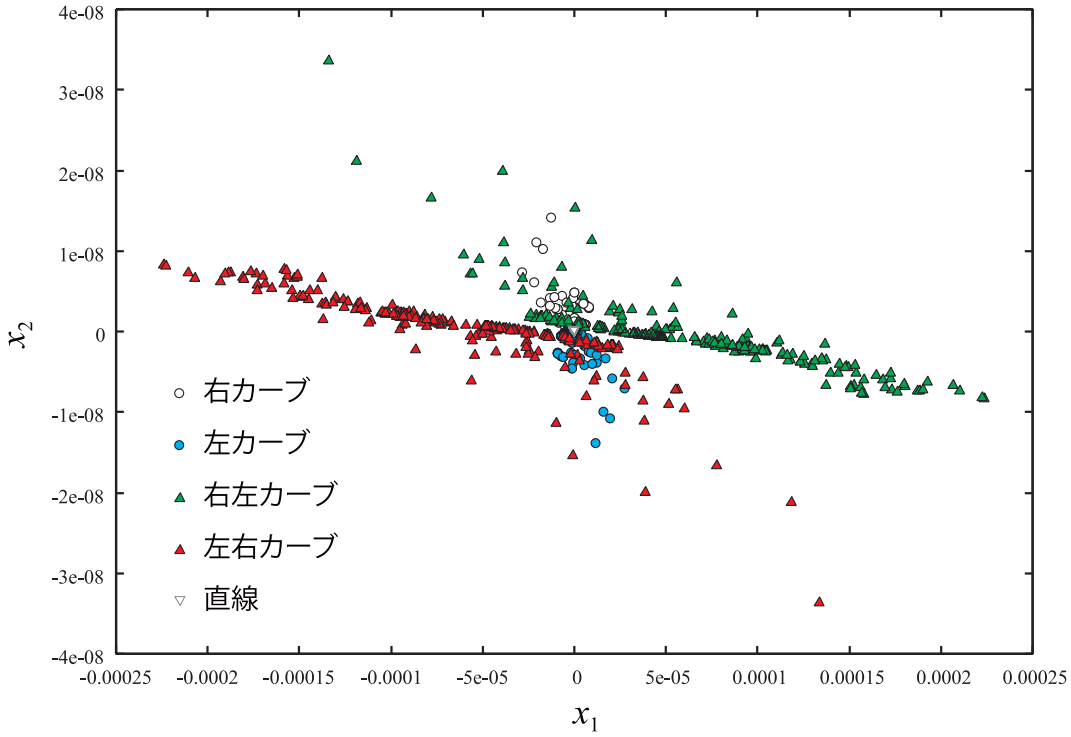


図 6.18: xy 座標系におけるクロソイド曲線のパラメータマップ

ラはキャリブレーションを行い，二つのカメラ間の関係を取得済みである．3 箇所で撮影を行い，視線誘導標に徐々に近づくように撮影し，全部で 48 シーンの画像となる．この画像から視線誘導標を検出し，3 次元位置を求め，クロソイド曲線を当てはめる．図 6.19 に，3 次元位置精度は低くなる遠方に視線誘導標が存在する二つのシーンを示す．図 6.19 より，それぞれのシーンの道路は右にカーブしていることがわかる．また，シーン 2 では視線誘導標の誤検出が存在する．しかしながら，曲線を当てはめる際に RANSAC を用いてアウトライヤの除去を行うため，視線誘導標のみを用いて当てはめることができている．

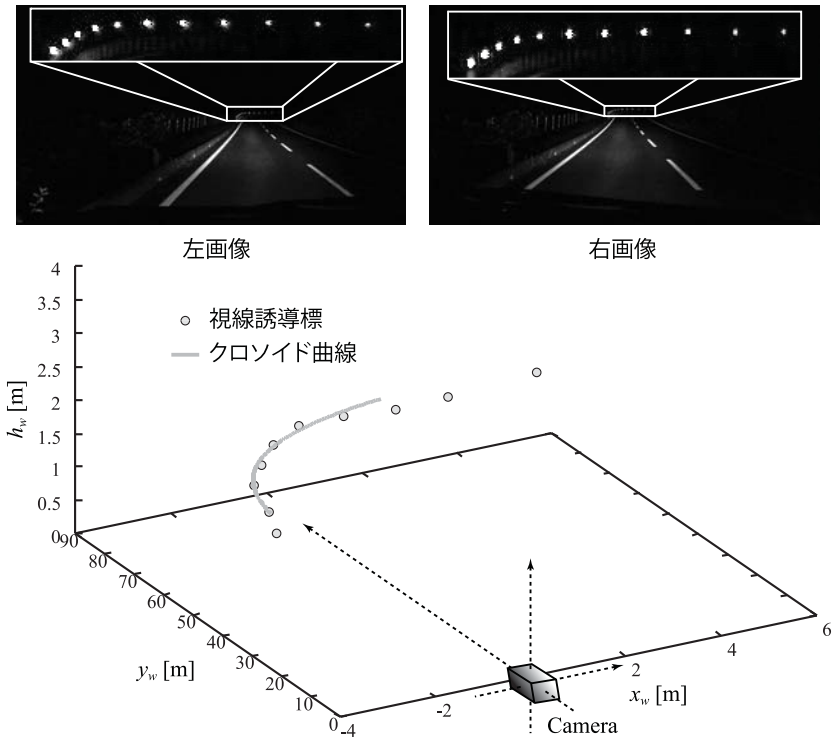
6.8 まとめ

視線誘導標は，前照灯の光を反射する装置であり，カーブに主に取り付けられている．そのため，夜間に運転する際，この視線誘導標の反射光が目印となり，カーブの見落としの防止が期待されている．そこで本章では，視線誘導標を用いた夜間の道路構造の認識法を提案した．視線誘導標の反射光が円形であることから，正規分布を基にした円検出フィルタを提案し，実際の車載カメラを用いた視線誘導標の検出実験において，95.4 % と高い検出率を得ることができた．道路構造の認識では，視線誘導標の 3 次元位置をクロソイド曲線に当てはめ，そのパラメータからカーブの分類を行

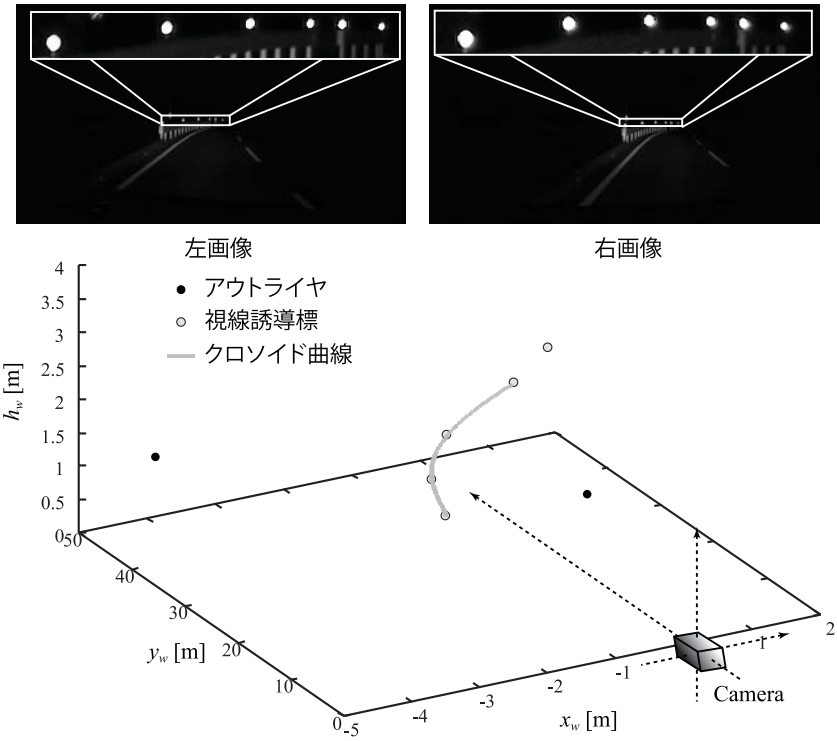
表 6.8: ノイズを含んだ際の分類精度 (1920x1080 pixel)[%].

ノイズ	0	1	2	3	4	5
右カーブ	96.3	90.0	84.8	83.7	81.9	77.0
左カーブ	93.0	89.3	79.6	63.0	68.5	67.4
右左カーブ	94.8	85.1	75.7	71.2	69.8	65.3
左右カーブ	91.7	85.1	83.0	74.0	75.0	69.8

う．カーブは右，左，右左，左右カーブの 4 種類に分類するが，各カーブは線形に分類することができない．そのため，SVM を用いて識別器の構築を行った．また，提案手法におけるクロソイド曲線の当てはめの際に，媒介変数 s を適切に設定することで，フィッティング精度が向上することを示し，SVM における分類性能も向上した．道路構造認識する実験では，86.9 % の精度で 4 カーブに分類できることを確認した．また，解像度を上げ 3 次元位置の推定精度を向上することで 93.9 %と高い分類率を得ることも確認した．以上のことから，提案する夜間における道路構造認識の有効性を確認した．



(a) シーン1



(b) シーン2

図 6.19: 視線誘導標の 3 次元位置にクロソイド曲線を当てはめた例

第7章

白線の3次元位置を用いた道路構造復元

6 章では，視線誘導標を利用することで，遠方領域の道路構造認識を行った．一方で，近傍領域から発生する白線の情報は密なデータであるため，道路構造を復元することなどに利用されている．そこで本章では，白線の 3 次元位置を用いた道路構造の復元について提案する．白線の 3 次元位置の推定は，**5** 章の手法を用いる．**7.1** において，背景を述べ，**7.2** において，道路構造の復元手法について述べ，**7.4** で，実験により提案手法の有効性を述べる．

7.1 背景

近年，市販自動車にもステレオカメラが搭載され，CV 技術により車両と歩行者の分類結果と距離情報を抽出し，アダプティブクルーズコントロール (ACC) とプリクラッシュブレーキ (PCB) が実現されている [11, 12]．このような ITS の分野では，運転者をサポートする様々な手法が提案されている．先進車両制御システム (AVCS:Advanced Vehicle Control Systems)[55] は，事象の早期検出と早期操作，ドライバの人為的誤りの排除，操作の確実性，ドライバ心理の影響排除，個別車両の制御可能性という特性を持つ．アメリカのフィリーウェイ上の事故の 90% 以上は人為的エラーが原因であり，事故をなくすためには自動化が必要であるという意見がある．また，走行環境認識技術 [56] では，代表的な技術としてマシンビジョン，レーザレーダ，ミリ波レーダを用いた技術が紹介されている．それぞれの手法の認識能力を向上させる必要があるが，複数のセンサを統合することによって，機能を補完する走行環境認識手法の実現が期待されている．

7.2 道路構造の復元

7.2.1 道路モデルとパラメータの定義

図 7.1 に本システムにおける定義を示す．本システムでは，ステレオ視などにより，道路の奥行きが求められているものとする．また，本システムで用いる座標系を以下に示す．

世界座標系 世界座標系は時刻変化に影響しない一定の原点を持ち，x_w, y_w, h_w とする．

カメラ座標系 カメラ座標系は時刻毎に変化し，カメラの光線を y 軸とし，x_c, y_c, h_c とする．回転行列 $\boldsymbol{R}$，平行移動ベクトル $\boldsymbol{T}$ を用いることにより，世界座標系へと変換される．

道路座標系 道路座標系は時刻毎に変化し，仮想中心線に沿う y 軸をとる座標系であり，x, y, h とする．

道路の仮想中心線は以下の式で表されるとする．

$$x = x(s), \quad y = y(s), \quad h = h(s) \tag{7.1}$$

s は媒介変数である．このとき，

$$\begin{cases} x(s) := x_0 + x_1 \frac{s^2}{2} + x_2 \frac{s^3}{6} \\ y(s) := s \end{cases} \tag{7.2}$$

$x_1 : x$ 軸の曲率変数，$x_2 : x$ 軸の曲率変化率，

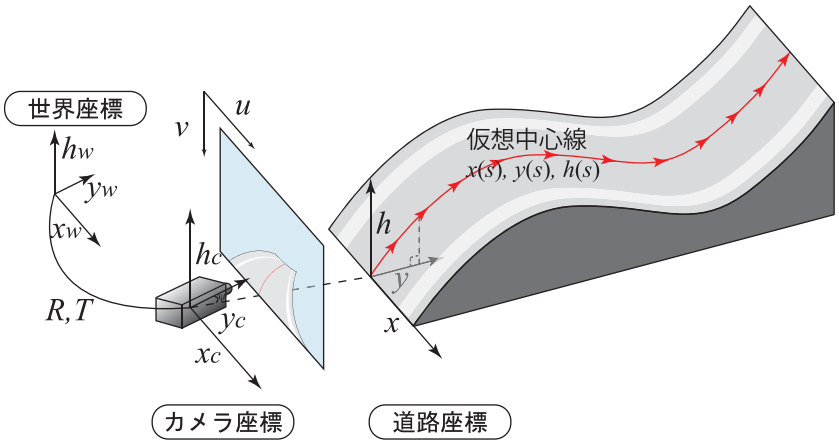
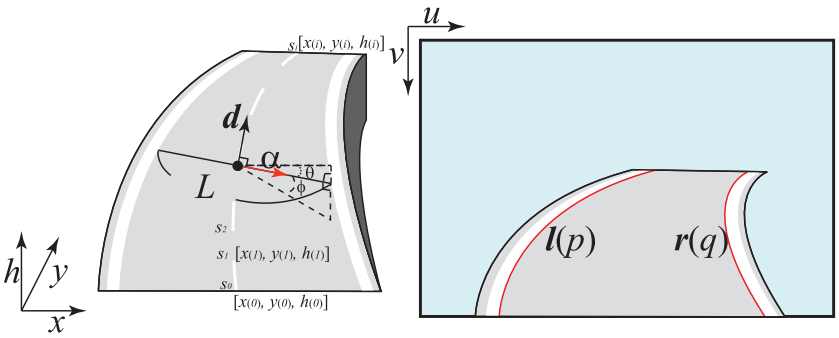


図 7.1: 道路モデルの定義

と定義し，クロソイド曲線に従うとする．また，$h(s)$ を 3 次関数と近似できるものとする．

$$h(s) := h_0 + h_1 s + h_2 \frac{s^2}{2} + h_3 \frac{s^3}{6} \tag{7.3}$$



(a) 道路座標　　(b) 画像座標

図 7.2: 道路の定義

図 7.2 に道路の定義を示す．$\boldsymbol{d}$ はある地点 s での進行 (接線) 方向ベクトルであり，

$$\boldsymbol{d} := \left[\frac{dx}{ds}, \frac{dy}{ds}, \frac{dh}{ds}\right] = \left[x_1 s + x_2 \frac{s^2}{2}, 1, h_1 + h_2 s + h_3 \frac{s^2}{2}\right]$$

と定義される．$\boldsymbol{\alpha}$ は進行方向ベクトル $\boldsymbol{d}$ に直交するベクトルとし，$\boldsymbol{\beta}$ を法線ベクトルとすると，以下の関係が成り立つ．

$$\boldsymbol{\alpha} := [\alpha_x(s), \alpha_y(s), \alpha_h(s)], \quad \boldsymbol{d} \cdot \boldsymbol{\alpha} = 0, \quad \boldsymbol{d} \times \boldsymbol{\alpha} \geqq 0 \tag{7.4}$$

$$\boldsymbol{\beta} := [\beta_x(s), \beta_y(s), \beta_h(s)] \tag{7.5}$$

また，$\boldsymbol{\alpha}$ の h 軸での回転角を θ，y 軸での回転角を ϕ とする以下の式が得られる．

$$\alpha_x = \cos\theta\cos\phi, \quad \alpha_y = \sin\theta\cos\phi, \quad \alpha_h = \sin\phi \tag{7.6}$$

このとき，勾配を示す角度 ϕ は道路座標系である．しかし，勾配は世界座標系で知る必要があるため，回転行列 $\boldsymbol{R}'$ をかけるとこにより世界座標系の角度 ϕ_w を求める．回転行列 $\boldsymbol{R}'$ は，ϕ が y_w 軸の回転だけに依存しているため，回転行列 $\boldsymbol{R}$ から y_w 軸の回転を取り出したものである．また，道路の設計上，ϕ_w は 5% ($\tan^{-1}(5\ [\mathrm{m}]/100\ [\mathrm{m}]) = 2.86$ 度) 以下という制限がある．

7.2.2 問題

本システムでは観測データ $\boldsymbol{l}(p)$，$\boldsymbol{r}(q)$ が求められたとき，$x(s)$，$y(s)$，$h(s)$，$\boldsymbol{d}$，$\boldsymbol{\alpha}$，L を求めることを考える．観測データは，左右の白線の画像座標 (u, v) とカメラ座標 (x_c, y_c, h_c) を得る．

$$\boldsymbol{l}(p) = [u^l(p), v^l(p), x_c^l(p), y_c^l(p), h_c^l(p)], \quad \boldsymbol{r}(q) = [u^r(q), v^r(q), x_c^r(q), y_c^r(q), h_c^r(q)] \tag{7.7}$$

7.3 道路パラメータの推定

本システムで得られるデータは左右の白線の画像座標およびカメラ座標系での 3 次元位置である．この情報より未知パラメータを求める方法を考える．最初に，荒い左右の白線に対する対応をとり，その中点を得る．その中点からクロソイド曲線と 3 次関数に当てはめる．次にこの当てはめた中心線より α を求める．またこのときに，道路の幅 L と中心点を求める．以下にその手法について述べる．

Step1 大まかな中心点の算出

図 7.3 に示すように画像座標 $(u_l(p), v)$，$(u_r(q), v)$ を対応点とし，その 3 次元位置から中心点を算出する．この中心点を $x_c(i)$，$y_c(i)$，$h_c(i)$ とし，データ番号 i で並んでいるとする．

$$x_c(i) = \frac{(x_c^l(p) + x_c^r(q))}{2}, \quad y_c(i) = \frac{(y_c^l(p) + y_c^r(q))}{2}, \quad h_c(i) = \frac{(h_c^l(p) + h_c^r(q))}{2} \tag{7.8}$$

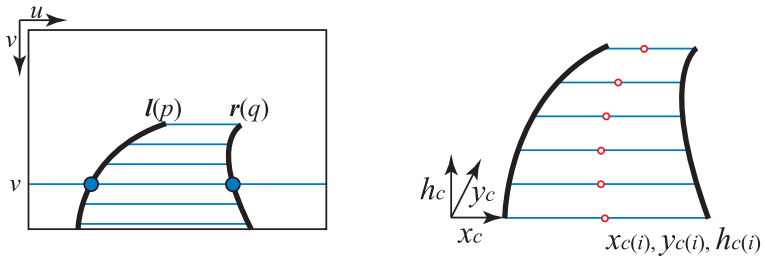


図 7.3: 大まかな中心点を算出

Step2 道路座標系に変換

媒介変数 s は，$y(s) = s$ という関係があり，ユークリッド距離で表現される．仮想中心線が直線の場合は，ユークリッド距離と $y_c(i)$ が同等であるため問題がない．しかし，曲がっている場合には，ユークリッド距離と $y_c(i)$ との間にずれが生じるため問題ある (図 7.4 参照)．そこで，クロソイド曲線を当てはめる際に，より仮想中心線に沿う軸に変換する必要がある．図 7.4 に示すように，直線を当てはめ，回転角 ψ を得ることにより s 軸の近似を行う．このとき，各 3 次元座標は以下の式で変換される．

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{X}_c \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \boldsymbol{T}_c \tag{7.9}$$

$\boldsymbol{X} = [x\ y\ h]$ は座標変換後の 3 次元位置，$\boldsymbol{X}_c = [x_c\ y_c\ h_c]$ はカメラ座標の 3 次元位置である．このとき，ψ，$\boldsymbol{T}_c$ は以下のように求める．

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{x_c(0)}{y_c(0)}\right), \quad \boldsymbol{T}_c = [x_c(0)\ y_c(0)\ h_c(0)]$$

Step3 仮想中心線の算出

(a) クロソイド曲線による当てはめ

中心点に LM(Levenberg-Marquardt) 法を用いてクロソイド曲線を当てはめる．式 (7.2) における媒介変数 s は道路座標系におけるユークリッド距離とし，以下のように求める．

$$s_0 = ||\boldsymbol{X}_d(0)|| \tag{7.10}$$

$$\Delta s_{i,i-1} = ||\boldsymbol{X}_d(i) - \boldsymbol{X}_d(i-1)|| \tag{7.11}$$

$$s_i = s_{i-1} + \Delta s_{i,i-1} \quad (i = 1, 2, 3 \cdots n)$$

この当てはめ結果により，パラメータ x_1, x_2 が求められる．

(b) 3 次関数による当てはめ

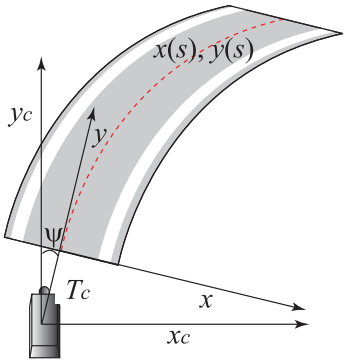


図 7.4: 軸の変換

中心点に LM 法を用いて 3 次関数を当てはめる．この当てはめ結果により，パラメータ h_1, h_2, h_3 が求められる．

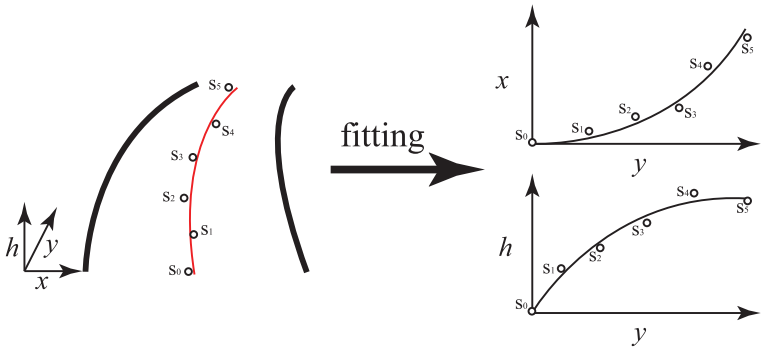


図 7.5: 中心を曲線に当てはめる

Step4 進行 (接線) 方向ベクトル d の算出

Step3 の (a)，(b) より得られたパラメータ x_1, x_2, h_1, h_2, h_3 から，仮想中心線の進行方向ベクトル $\boldsymbol{d}$ を以下の式で求める．

$$
\begin{aligned}
\frac{dx}{ds} &= x_1 s + x_2 \frac{s^2}{2} \\
\frac{dy}{ds} &= 1 \\
\frac{dh}{ds} &= h_1 + h_2 s + h_3 \frac{s^2}{2}
\end{aligned}
\tag{7.12}
$$

Step5 直交ベクトル α，道路幅 L，中心点の算出

方向ベクトル $\boldsymbol{d}$ に直交するベクトル $\boldsymbol{\alpha}$ は，無数に存在するため一意に決定できない．そこで，

$\boldsymbol{\alpha}$ を観測データ $\boldsymbol{l}(p)$，$\boldsymbol{r}(q)$ と方向ベクトル $\boldsymbol{d}$ から求められる図 7.6 に示すような平面から求める．以下に，$\boldsymbol{\alpha}$ を求める方法を示す．

StepI $\boldsymbol{d}$ を法線ベクトルとする平面 D を算出

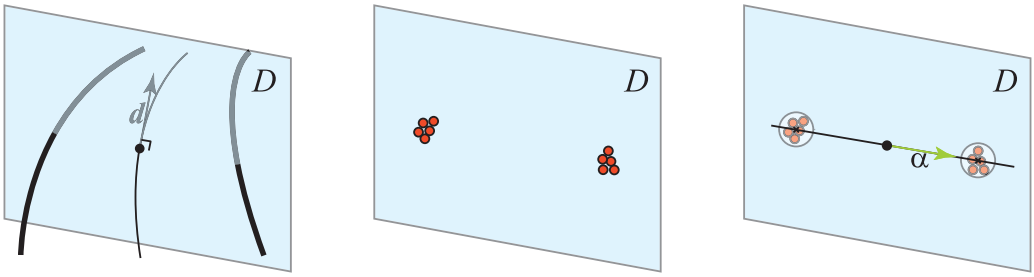
StepII 平面に左右のデータ番号 $(s_i - \Delta)$ から $(s_i + \Delta)$ の 3 次元位置を平面 D に投影

StepIII 投影した左右の点から中間値 $(\hat{x^l}(i), \hat{y^l}(i), \hat{h^l}(i))$，$(\hat{x^r}(i), \hat{y^r}(i), \hat{h^r}(i))$ を算出

StepIV 中間値から $\boldsymbol{\alpha}'$，道路の幅 L，中心点 $(\hat{x(i)}, \hat{y(i)}, \hat{h(i)})$ を算出

$$\alpha'_x = x_r(i) - x_l(i), \quad \alpha'_y = y_r(i) - y_l(i), \quad \alpha'_h = h_r(i) - h_l(i) \tag{7.13}$$

$$L = \sqrt{(x_l(i) - x_r(i))^2 + (y_l(i) - y_r(i))^2 + (h_l(i) - h_r(i))^2} \tag{7.14}$$



(a) dを法線ベクトルとする平面を作成　(b) 平面に左右の数点を投影　(c) 左右の集合より中心点を算出し，αを求める

図 7.6: α の算出

Step6 カメラ座標系へ変換

Step2 において，座標系は回転が加えられているため，カメラ座標系へ変換する．

$$[\alpha_x\ \alpha_y\ \alpha_h] = [\alpha'_x\ \alpha'_y\ \alpha'_h] \begin{bmatrix} \cos(-\psi) & \sin(-\psi) & 0 \\ -\sin(-\psi) & \cos(-\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \boldsymbol{T}_c$$

$$[x_c(i)\ y_c(i)\ h_c(i)] = [\hat{x(i)}\ \hat{y(i)}\ \hat{h(i)}] \begin{bmatrix} \cos(-\psi) & \sin(-\psi) & 0 \\ -\sin(-\psi) & \cos(-\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \boldsymbol{T}_c$$

Step7 繰り返し処理

左右の対応を正確にするため，Step2~Step6 の処理を新しい中心点を用いて繰り返し行う．

Step8 世界座標系へ変換

クロソイド曲線のパラメータ (x_1, x_2)，3 次関数のパラメータ (h_1, h_2, h_3) の変化が収束した場合，カメラ座標系から世界座標系への変換を行う．変換には，ego-motion やジャイロなどから得られる回転行列 $\boldsymbol{R}$ と平行移動ベクトル $\boldsymbol{T}$ を用いる．

$$[x_w\ y_w\ h_w] = \boldsymbol{R}[x_c\ y_c\ h_c]^T + \boldsymbol{T} \tag{7.15}$$

7.4 道路構造復元の実験

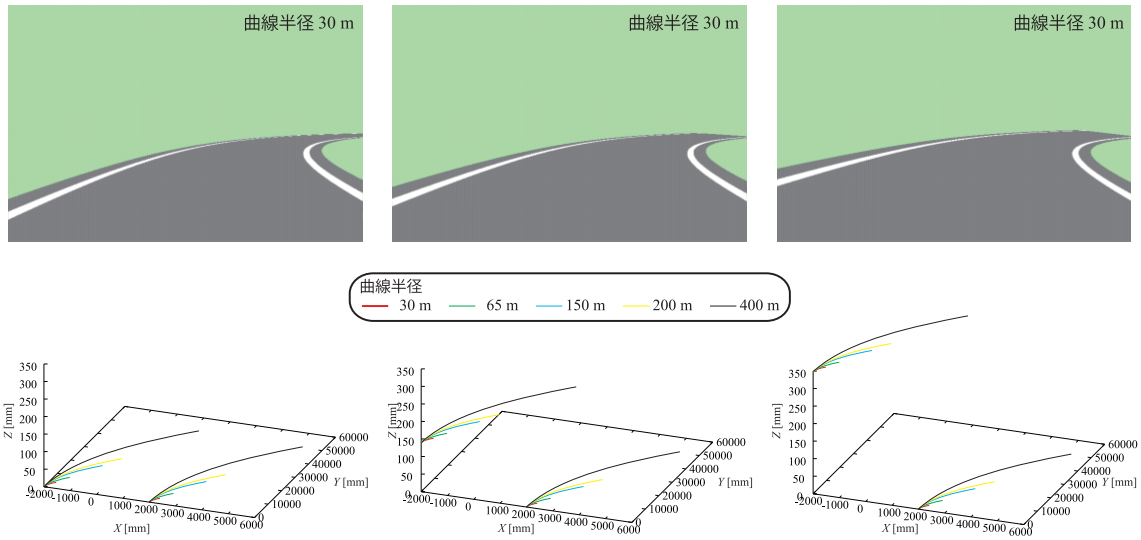
本手法の有効性を示すため，CG 画像を用いた評価実験を行う．仮想 3 次元空間にカーブを発生し，そのカーブに設置された白線の 3 次元位置を推定し，それを基に道路構造の復元を行う．また，カーブに使用する曲線半径は，400 m，200 m，150 m，65 m，30 m，白線から白線の距離を 4m とする (図 7.7 参照)．また，左側の勾配を 2 度と 5 度とした道路を作成し推定することで，勾配のある道路でも構造の復元を行う．

評価として，白線間の距離を用いる．表 7.1 から表 7.2 に，提案手法によって白線間の距離を求めた際の平均と標準偏差，真値 (4m) との平均誤差と標準偏差を示す．各表における反復回数の初期は，最初に大まかに中心点を算出する際に対応付けた点による距離である．初期は，大まかに中心を算出しているため標準偏差が大きく，正確な道路幅が推定出来ていないことがわかる．提案手法では，反復処理により道路の中心と勾配，道路幅の推定を行うことで，標準偏差が小さくなり，推定が収束していることが分かる．また，5 度の勾配があるシーンの復元例を図 7.8 に示す．勾配がある道路の復元では，初期値の誤差は勾配のないシーンに比べると大きい．しかし，提案手法により繰り返し処理を行うことで真値に近い値を出力することができている．したがって，提案手法では，勾配のある路面でも十分に効果が発揮できることを確認した．

7.5 まとめ

本章では，白線の 3 次元位置を用いて道路構造の復元手法について述べた．白線は，道路構造に基づき引かれているため，この白線を使用することは有用である．提案手法では，白線の中間に仮想中心線を仮定し，その中心線を基準に道路の勾配と道路幅の推定を行う．初期の仮想中心線は画像中から道路の両端を選択するため，正確な道路幅を推定することができない．しかし，繰り返し処理をすることにより，精度よく道路幅を推定することが可能である．

シミュレーション実験において，提案手法は，様々な曲線半径を持つ道路においても，道路幅を推定できることを示し，勾配が徐々に変化するシーンにおいても道路形状を復元することができることも確認した．



(a) 勾配 0 度　(b) 勾配 2 度　(c) 勾配 5 度

図 7.7: 各曲線半径と勾配における CG 画像と道路構造

表 7.1: 道路の幅の平均値と真値との平均誤差 [mm]

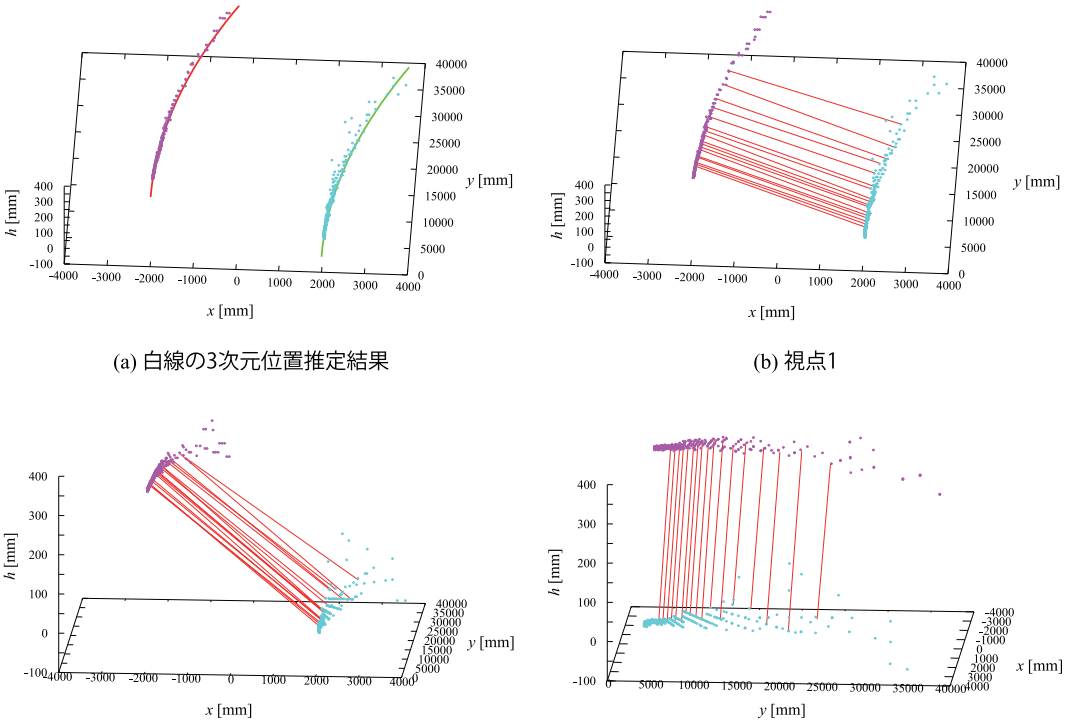
曲線半径	反復回数	道路幅		誤差	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
400	初期	4009.9	161.0	42.7	169.3
	1	3983.1	29.9	24.8	30.9
	2	3982.9	29.8	24.8	30.8
200	初期	3998.5	63.4	24.8	67.5
	1	3987.5	29.4	24.0	31.5
	2	3986.6	29.5	24.4	31.5
150	初期	4003.2	54.5	24.1	61.0
	1	3994.2	44.6	28.3	49.8
	2	3994.8	48.4	30.2	54.3
65	初期	4020.2	28.5	22.7	51.5
	1	3986.1	30.9	24.1	32.5
	2	3985.2	31.8	24.8	33.3
30	初期	4131.2	111.1	131.2	284.9
	1	4012.0	90.0	46.1	107.1
	2	4013.1	90.3	45.6	107.8

表 7.2: 道路の幅の平均値と真値との平均誤差 [mm] (勾配 2 度)

曲線半径	反復回数	道路幅		誤差	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
400	初期	4304.3	435.5	304.3	748.4
	1	3969.5	30.3	33.3	30.4
	2	3968.6	28.7	33.1	28.8
200	初期	4212.1	229.0	212.1	482.1
	1	3971.3	26.8	31.5	26.9
	2	3970.1	24.9	31.3	24.9
150	初期	4413.3	661.8	413.3	1058.9
	1	3977.9	21.0	23.5	21.1
	2	3981.1	50.5	29.3	51.6
65	初期	4473.0	555.6	473.0	1097.2
	1	3971.6	158.1	57.2	160.8
	2	3996.9	127.2	60.2	139.5
30	初期	4678.0	663.7	678.0	1509.8
	1	3996.8	133.1	69.5	148.8
	2	3980.0	145.1	68.4	153.0

表 7.3: 道路の幅の平均値と真値との平均誤差 [mm](勾配 5 度)

曲線半径	反復回数	道路幅		誤差	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
400	初期	5887.5	1935.9	1887.5	4242.5
	1	3957.8	51.0	49.5	51.5
	2	3956.6	49.7	49.3	50.0
200	初期	6633.7	3804.2	2633.7	6497.6
	1	3972.5	39.4	39.1	41.1
	2	3975.2	50.2	44.9	54.1
150	初期	6647.0	2851.2	2647.0	6013.1
	1	3972.0	33.5	37.4	34.8
	2	3978.9	51.2	42.7	55.6
65	初期	6423.8	2349.7	2423.8	5387.1
	1	3969.7	172.0	79.2	178.9
	2	3973.8	178.4	83.5	187.5
30	初期	6281.1	1890.2	2281.1	4938.3
	1	4039.4	212.4	110.3	259.9
	2	4009.4	184.7	85.6	207.7



(a) 白線の3次元位置推定結果

(b) 視点1

(c) 視点2

(d) 視点3

図 7.8: 曲線半径 400 m に勾配をつけた路面に対する形状復元

第8章

結論

本論文では，複数非同期カメラを用いた高速 3 次元位置推定法について述べ，さらに，車載カメラへ応用した道路構造の認識手法について述べた．各章毎のまとめは次のとおりである．

3 章では，非同期固定カメラを用いた高速 3 次元位置推定法について提案した．最新フレームより前フレームの 3 次元位置を推定し，その 3 次元位置から 3 次元空間中に 2 次関数を生成し，その 2 次関数と最新フレームで実際に観測した点から求められる光線と最も近い位置を最新フレームの 3 次元位置とする．シミュレーション実験では，仮想 3 次元空間を作成し，運動の復元実験を行った．実際のカメラを使用した実験では，対象物の等速円運動を復元することにより評価を行った．この 2 つの実験により，本手法がステレオ視と同等の精度で 3 次元位置を求めることが可能であることを確認した．また，バウンドしているボールの 3 次元位置を推定することができることも確認した．多眼に拡張することにより，カメラの台数 ×30 ポイントの 3 次元位置を出力することができるため，高速なビジュアルフィードバック制御が可能である．

4 章では，**3** 章で提案した固定非同期カメラの 3 次元位置推定法を拡張することにより，パン · チルト非同期カメラでも 3 次元位置を推定する手法を提案した．固定非同期カメラでは，画像座標上に対象物の軌跡を補間し，3 次元位置の推定をしたが，パン · チルトカメラは，画像平面の向きが同一ではないため，画像上に対象物の軌跡を推定することは不可能である．そこで，カメラの内部・外部パラメータを用いることで，3 次元空間中に曲面として対象物の軌跡を求める．この曲面と他方のカメラの交点を 3 次元位置とする．曲面と光線の交点を算出する手法は容易ではないため，曲面を平面の集合として扱うことで，交点を算出した．シミュレーション実験と実際のカメラを用いた実験を行うことにより，ステレオ視と同等の精度で 3 次元位置を求めることを示し，本手法の有効性を確認した．提案手法は，非同期パン · チルトカメラに対応することができ，広範囲で対象物の 3 次元位置推定が可能である．そのため，球技などのスポーツへの展開が期待できる．

5 章では，**3** 章，**4** 章における一つの対象物を非同期カメラを用いて 3 次元位置を推定する手法と違い，特定の対象物だけでなく，面の 3 次元情報を推定する手法を提案した．従来の Space Sweeping 法は，z 平面に 3 次元空間中にグリッドを作成し，エッジから作成される光線と z 平面の交点であるグリッドに投票することで奥行きを推定する．z 平面の移動間隔とグリッドの分割数は，投票空間を作成する際のメモリに大きく係わり，細かくするほどメモリを多く使用するという問題がある．提

案手法では，z 平面におけるエッジ間の距離を定式化することでメモリ量の解決をした．また，定式化された式は 2 次関数となるため，2 次関数の頂点を求めることで，光線間の距離が最小となる奥行きを直接算出することができる．それにより，奥行きの精度は移動させた z 平面のみではなく，細かい精度で出力することが可能となった．

3 章，**4** 章，**5** 章では，対象物やエッジなどの 3 次元位置を推定する手法を提案した．これらの推定結果を用いることで，実利用可能な応用が期待できる．そこで，**7** 章では，白線の 3 次元位置情報から道路構造の復元を行う手法を提案し，**6** 章では，視線誘導標の 3 次元位置から道路構造の推定を行う手法を提案した．

6 章では，遠方まで視認可能である視線誘導標を用いて道路の構造を推定する手法を提案した．視線誘導標は，前照灯の光を反射する装置であり，カーブに主に取り付けられている．そのため，夜間に運転する際，この視線誘導標の反射光が目印となり，カーブの見落としの防止が期待されている．視線誘導標の反射光が円形であることから，正規分布を基にした円検出フィルタを提案し，実際の車載カメラを用いた視線誘導標の検出実験において，95.4 % と高い検出率を得ることができた．道路構造の認識では，視線誘導標の 3 次元位置をクロソイド曲線に当てはめ，そのパラメータからカーブの分類を行う．カーブは右，左，右左，左右カーブの 4 種類に分類するが，各カーブは線形に分類することができない．そのため，SVM を用いて識別器の構築を行った．また，提案手法におけるクロソイド曲線の当てはめの際に，媒介変数 s を適切に設定することで，フィッティング精度が向上することを示し，SVM における分類性能も向上した．道路構造認識する実験では，86.9 % の精度で 4 カーブに分類できることを確認した．また，解像度を上げ 3 次元位置の推定精度を向上することで 93.9 %と高い分類率を得ることも確認した．

7 章では，両端の白線から道路の中心線を推定し，その中心線にクロソイド曲線を当てはめ，その当てはめ結果から両端を再選択するという処理を繰り返し行うことにより，道路構造の復元を行う手法を提案した．シミュレーション実験において，提案手法は，大まかに求めた中心線から繰り返し処理を行うことにより，精度よく道路幅を推定できることを示した．様々な曲線半径を持つ道路においても，道路幅を推定でき，勾配が徐々に変化するシーンにおいても道路形状を復元することが可能である．

謝　辞

本研究を行うにあたり，終始懇切なご指導を賜りました中部大学工学部情報工学科 藤吉弘亘准教授に深く感謝の意を表します.

本論文をまとめるにあたり，有益なご討論，ご助言を賜りました中部大学工学部情報工学科 岩堀祐之教授，平田豊教授，中野良平教授に謹んで深謝します.

本研究において，様々な意見を頂いた Takeo Kanade U.A. and Helen Whitaker University Prof., RI/CS に心から厚く御礼申し上げます.

最後に，本研究で用いたプログラムの開発や研究の相談など協力して頂いた藤吉研究室の皆様に感謝致します.

参考文献

[1] M. Okutomi and T. Kanade: “A Multiple Baseline Stereo”, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 4, pp. 353–363, 1993.

[2] 川田工業株式会社. http://www.kawada.co.jp/mechs/index.html.

[3] 富士通フロンテック. http://www.frontech.fujitsu.com/services/products/robot/servicerobot/.

[4] 山本和彦, 棚橋英樹, 桑島茂純, 丹羽義典: “実環境センシングのための全方向ステレオシステム（SOS）”, 電気学会論文誌C, Vol. 121-C, pp. 876–881, 2000.

[5] 佐藤雄隆, 坂上勝彦: “全方向ステレオシステム (SOS) を搭載したインテリジェント電動車いすの開発”, ビジョン技術の実利用ワークショップ (ViEW2006) 論文集, pp. 231–236, 2006.

[6] C. Zhou and H. Tao: “Dynamic Depth Recovery from Unsynchronized Video Streams”, In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 351–358, 2003.

[7] M. Svedman, L. Goncalves, N. Karlsson, M. Munich, and P. Pirjanian: “Structure from Stereo Vision using Unsynchronized Cameras for Simultaneous Localization and Mapping”, In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3069–3074, 2005.

[8] 関晃仁, 奥富正敏: “非同期ステレオ動画像を用いた同時最適化による位置とモーションの推定”, 情報処理学会論文誌:コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 49, No. SIG6 (CVIM20), pp. 22–34, 2008.

[9] 高野橋健太, 眞鍋佳嗣, 安室喜弘, 井村誠孝, 千原國宏: “残像を利用したボールの 3 次元軌跡の計測”, 情報処理学会論文誌:コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 48, No. SIG1 (CVIM17), pp. 35–47, 2007.

[10] HONDA. “ナイトビジョン”. http://www.honda.co.jp/safety/technology/car-safety/main-technology/night/index.html.

[11] 齊藤徹, 森光登, 関口幸弘, 丸山匡, 加藤寛基, 松浦宗徳, 柴田英司: “ステレオ画像認識運転支援システムのソフトウェア開発について”, 第 14 回画像センシングシンポジウム (SSII2008), IN2-14, 2008.

[12] 片平聡, 高橋靖, 並木信夫, 柴田英司: “ステレオ画像認識運転支援システムのハードウエア開発について”, 第 14 回画像センシングシンポジウム (SSII2008), IN2-15, 2008.

[13] Y. Ohta and T. Kanade: “Stereo by Intra- and Inter-Scanline Search Using Dynamic Programming”, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 7, No. 2, pp. 139–154, 1985.

[14] R. T. Collins: “A Space-Sweep Approach to True Multi-Image Matching”, In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 358–363, 1996.

[15] X. Zabulis, G. Kordelas, K. Mueller, and A. Smolic: “Increasing the Accuracy of the Space-Sweeping Approach to Stereo Reconstruction, Using Spherical Backprojection Surfaces”, In *IEEE International Conference on Image Processing*, 2006.

[16] D. Gallup, J.-M. Frahm, P. Mordohai, Q. Yang, and M. Pollefeys: “Real-Time Plane-Sweeping Stereo with Multiple Sweeping Directions”, In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1–8, 1996.

[17] 清水彰一, 藤吉弘亘: “カメラ間のシャッタータイミングのずれを利用した高速 3 次元位置推定”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), 第 1 巻, pp. 428–433, 2004.

[18] P. Grossmann: “Depth from focus”, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 5, pp. 63–69, 1987.

[19] 藤原孝幸, 室伏広治, 湯浅景元, 輿水大和: “蛍狩りカメラを用いたアスリートの運動解析システムの提案”, 情報科学技術レターズ, Vol. 6, pp. 305–307, 2007.

[20] 瀬古保次, 佐口泰之, 堀田宏之, 伊與田哲男, 輿水大和: “『蛍狩り計測法』: レンズの球面収差によるリング像の形成とそのハフ変換を利用した単眼多点 3D 位置計測”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J91-D, No. 8, pp. 2121–2128, 2008.

[21] 杉本茂樹, 奥富正敏: “カメラアレイを利用した任意画像領域に対する仮想焦点画像生成”, 第 14 回画像センシングシンポジウム (SSII2008), IN3-02, 2008.

[22] J. Canny: “A computational approach to edge detection”, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, No. 6, pp. 679–698, 1986.

[23] 森大樹, 内海章, 大谷淳, 谷内田雅彦, 中津良平: “非同期多視点画像による人物追跡システムの構築”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-II, pp. 102–110, 2001.

[24] D. G. Lowe: “Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints”, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110, 2004.

[25] 藤吉弘亘: “Gradient ベースの特徴抽出:SIFT と HOG”, 情報処理学会 CVIM 研究会資料, Vol. 2007, No. 87, pp. 211–224, 2007.

[26] P. J. Besl: “Active, optical range imaging sensors”, *Machine Vision and Applications*, Vol. 1, pp. 127–152, 1988.

[27] F. Blais: “A Review of 20 Years of Ranges Sensor Development”, *SPIE*, Vol. 5013, pp. 62–76, 2002.

[28] 出澤正徳, 谷田貝豊彦: “モアレトポグラフィー”, テレビジョン学会誌, Vol. 34, No. 9, pp. 800–807, 1980.

[29] M. Rioux: “Laser range finder based on synchronized scanners”, *Applied Optics*, Vol. 23, pp. 3837–3844, 1984.

[30] J. A. Beraldin, F. Blais, P. Boulanger, L. Cournoyer, J. Domey, S. F. El-Hakim, G. Godin, M. Rioux, and J. Taylor: “Real world modelling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 55, pp. 230–250, 2000.

[31] Y. Shirai: “Recognition of polyhedrons with a range finder”, *Pattern Recognition*, Vol. 4, pp. 243–244, 1972.

[32] 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳: コンピュータビジョン 技術評論と将来展望. 新技術コミュニケーションズ: 1998.

[33] 佐藤幸男, 長谷川一英: “レンジファインダ Cubicscope の実用的諸応用”, 日本機械学会 [No.99-9] ロボティクス・メカトロニクス講演会’99 講演論文, 2P2-72-061, 1999.

[34] T. Kanade, A. Gruss, and L. R. Carley: “A VLSI sensor based rangefinding system”, In *The fifth international symposium on Robotics research*, pp. 49–56, 1990.

[35] 中沢和夫, 中島真人, 小林寛: “ファイバーグレイティングを用いた 3 次元形状計測システムの開発”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J69-D, No. 12, pp. 1929–1935, 1986.

[36] 立石雅輝, 石山英俊, 梅田和昇: “マルチスポットレーザプロジェクタを用いた 200Hz 小型距離画像センサの構築”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 739, pp. 499–505, 2008.

[37] 石山英俊, 梅田和昇: “屋外照明環境での 200Hz 距離画像計測”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3I1-01, 2008.

[38] B. Biittgen, T. Oggier, M. Lehmann, R. Kaufmann, and F. Lustenberger: "CCD/CMOS Lock-in pixel for range imaging: challenges, limitations and state-of-the-art", In *1st range imaging research day*, 2005.

[39] T. Oggier, M. Lehmann, R. Kaufmann, M. Schweizer, M. Richter, P. Metzler, G. Lang, F. Lustenberger, and N. Blanc: *Optical Design and Engineering*: chapter An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (SwissRanger), pp. 534–545. SPIE: 2004.

[40] 高橋桂太, 苗村健: "Light Field Rendering における合焦判定法の空間解析", 情報処理学会研究報告, Vol. 2004, No. 126, pp. 57–62, 2004.

[41] 高橋桂太, 久保田彰, 苗村健: "Light Field Rendering における合焦判定と全焦点画像合成", 電子情報通信学会論文誌. D-II, Vol. 88, No. 3, pp. 573–584, 2005.

[42] C. Thorpe, M. Hebert, T. Kanade, and S. Shafer: "Vision and Navigation for the Carnegie-mellon Navlab", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 3, pp. 362–373, 1988.

[43] C. J. Taylor, J. Malik, and J. Weber: "A real-time approach to stereopsis and lane-finding", In *IEEE Intelligent Vehicles Symbosium*, pp. 207–212, 1996.

[44] A. Takahashi and Y. Ninomiya: "model-based lane recognition", In *IEEE intelligent vehicles symposium*, pp. 201–206, 1996.

[45] M. Bertozzi and A. Broggi: "GOLD: a parallel real-time stereo vsion system for generic obstacle and lane detection", *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 7, pp. 62–81, 1998.

[46] D. Khosla: "Accurate estimation of forward path geometry using two-clothoid road model", In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Vol. 1, pp. 154–159, 2002.

[47] Y. Wang, D. Shen, and E. K. Teoh: "Lane detection using catmull-rom spline", In *IEEE intelligent Vehicles Symposium*, Vol. 1, pp. 51–57, 1998.

[48] R. Aufrère, R. Chapuis, and F. Chause: "A model-driven approach for real-time road recognition", *Machine Vision and Applications*, Vol. 13, No. 2, pp. 95–107, 2001.

[49] S. Nedevschi, R. Schmidt, T. Graf, R. Danescu, D. Frentiu, T. Marita, F. Oniga, and C. Pocol: "3D lane detection system based on stereovision", In *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pp. 161–166, 2004.

[50] D. Pomerleau: "RALPH: rapidly adapting lateral position handler", In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 506–511, 1995.

[51] 足立淳, 佐藤淳: “未校正カメラによる自車両位置推定”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-D, No. 1, pp. 74–83, 2006.

[52] 社団法人日本道路協会: 視線誘導標設置基準・同解説. 日本道路協会: 1984.

[53] Nello Cristianini(原著), John Shawe - Taylor(原著), 大北 剛 (翻訳): 「サポートベクターマシン入門」. 共立出版: 2005.

[54] M. A. Fischler and R. C. Bolles: “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”, *Commun. ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, 1981.

[55] 津川定之: “先進車両制御システム”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 1997, pp. 592–593, 1997.

[56] 二宮芳樹: “ITS における自動車の高機能化：走行環境認識技術”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 99, No. 98, pp. 33–39, 1999.

研究業績一覧

学術論文

[1] 清水彰一, 藤吉弘亘, 長坂保典, 高橋友一, 岩堀祐之: “複数の非同期パン・チルトカメラを用いた 3 次元位置推定”, 精密工学会論文誌, Vol. 75, No. 2, pp.284–289, 2009.

[2] 清水彰一, 藤吉弘亘, 酒井裕史, 金出武雄, 岩堀祐之: “視線誘導標を用いた夜間の道路構造認識”, 電気学会論文誌, 採録決定済み.

[3] 清水彰一, 藤吉弘亘, 岩堀祐之, 酒井裕史, 金出武雄: “白線と視線誘導標の 3 次元位置を用いた道路構造の認識”, 第 6 回情報科学技術フォーラム, 情報科学技術レターズ, Vol. 6, pp. 425–428, 2007.

国際会議発表論文 (査読あり)

[1] H. Fujiyoshi, S. Shimizu, Y. Nagasaka and T. Takahashi: “Fast 3D Position Measurement with Two Unsynchronized Cameras”, IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotic and Automation, Vol.3, pp.1239–1244, 2003.

[2] S. Shimizu, H. Fujiyoshi, Y. Nagasaka and T. Takahashi: “A Pseudo Stereo Vision Method for Unsynchronized Cameras”, Asian Conference on Computer Vision, Vol. 1, pp. 575–580, 2004.

[3] H. Fujiyoshi, S. Shimizu, Y. Nagasaka and T. Takahashi: “A Method of Pseudo Stereo Vision from Images of Cameras Shutter Timing Adjusted”, RoboCup2004 SYMPOSIUM, 2004.

[4] S. Shimizu, T. Nagahashi and H. Fujiyoshi: “Robust and Accurate Detection of Object Orientation and ID without Color Segmentation”, RoboCup2005 SYMPOSIUM, 2005.

[5] S.Shimizu, H. Fujiyoshi, H. Sakai and T. Kanade: “Recognition of Road Contours Based on Extraction of 3D Positions of Delineators”, Proc. of the 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, pp. 673–677, 2007.

学会口頭発表 (査読あり)

[1] 清水彰一, 藤吉弘亘: “カメラ間のシャッタータイミングのずれを利用した高速 3 次元位置推定”, MIRU2004, Vol. 1, pp. 428–433, 2004.

学会口頭発表 (査読なし)

[1] 清水彰一, 西貴行, 藤吉弘亘, 長坂保典, 高橋友一: “2 台の非同期カメラによる仮想高速ビジョンシステムの実現”, 人工知能学会第 17 回 SIG-Challenge 研究会, pp.19 – 24,2003.

[2] 清水彰一, 藤吉弘亘: “非同期カメラを用いた高速 3 次元位置推定のシミュレーション評価”, 平成 15 年電気関係学会東海支部連合大会, p.30, 2003.

[3] 清水彰一, 藤吉弘亘: “移動ロボット上の 2 台の非同期カメラによる 3 次元位置推定の基礎検討”, 第 5 回計測自動制御学会 (SICE) システムインテグレーション部門講演会, p. 179, 2004.

[4] 清水彰一, 藤吉弘亘, 長坂保典, 高橋友一: “3 台のカメラを用いた擬似ステレオによる 3 次元位置推定”, 人工知能学会第 19 回 SIG-Challenge 研究会, pp. 6–11, 2004.

[5] 清水彰一, 藤吉弘亘: “非同期カメラにおける 3 次元位置推定法とそのシミュレーション評価 ”, 平成 16 年電気関係学会東海支部連合大会, p. 302, 2004.

[6] 永橋知行, 清水彰一, 藤吉弘亘: “照明変動に頑健な ID 認識とロボットの姿勢検出”, 人工知能学会第 21 回 SIG-Challenge 研究会, pp. 32–37, 2005.

[7] 清水彰一, 藤田征士, 草富省吾, 伊藤孝浩, 藤吉弘亘: “ARToolKit を用いたヒューマノイドロボットのモーション推定”, 人工知能学会第 27 回 SIG-Challenge 研究会, pp. 44–49, 2008.

[8] 清水彰一, 藤吉弘亘, 酒井裕史, 金出武雄: “視線誘導標を用いた道路構造認識”, 第 6 回 ITS シンポジウム 2007, pp. 113–118, 2007.

学内論文

[1] 長坂保典，藤吉弘亘，田中良幸，清水彰一，小関亮介，瀧口佑介: “視覚情報を用いた分散ロボットの制御”，情報科学リサーチジャーナル, Vol.11, pp. 101–110，2004.

[2] 長坂保典，藤吉弘亘，高橋友一，藤井隆司，佐伯守彦，柴田祥一，清水彰一，小川佳丈，林裕司，土屋成光，都築勇司: “視覚情報を用いた分散ロボットの制御 (2)”，情報科学リサーチジャーナル, Vol.12, pp. 81–97，　2005.

著書

[1] S.Shimizu, H.Fujiyoshi, Y.Nagasaka and T.Takahashi: “Scene Reconstruction, Pose Estimation and Tracking: A Pseudo Stereo Vision Method using Asynchronous Multiple Cameras”, I-Tech ISBN 978-3-902613-06-6, pp.185–196, 2007.

[2] H.Fujiyoshi, T.Nagahashi and S. Shimizu: “Robotic Soccer: Robust and Accurate Detection of Object Orientation and ID without Color Segmentation”, I-Tech ISBN 978-3-902613-21-9, pp.395–406, 2007.

学術表彰

[1] 2005 年度ロボカップ研究賞
研究題目「Robust and Accurate Detection of Object Orientation and ID without Color Segmentation」

その他

[1] Visiting graduate student, Carnegie Mellon University, 平成 17 年 9 月〜平成 18 年 8 月.