

Title	複数のカメラを用いた3次元移動物体追跡に関する研究
Author(s)	田縁, 英治
Citation	
Issue Date	1997-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1064
Rights	
Description	Supervisor:阿部 亨, 情報科学研究科, 修士

修士論文

複数のカメラを用いた 3次元移動物体追跡に関する研究

指導教官 阿部 亨 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

田縁 英治

1997年2月14日

目次

1	序論	1
1.1	研究の目的と背景	1
1.2	本論文の構成	3
2	多視点画像	4
2.1	はじめに	4
2.2	ステレオ視の原理と性質	4
2.3	多視点画像の定義と特徴	7
2.4	多視点画像を用いた従来の研究	8
2.5	まとめ	11
3	多視点動画画像を用いた対象物体の対応づけ	12
3.1	はじめに	12
3.2	多視点動画画像	13
3.3	移動軌跡を用いた対象物体の対応づけ手法	16
3.3.1	本手法の構築にあたっての方針	16
3.3.2	対応づけに用いる特徴量	16
3.3.3	3次元移動軌跡の復元	20
3.4	重心平面の3次元位置情報を利用した対応づけ	22
3.4.1	重心平面の3次元位置	22
3.4.2	双対空間	23
3.4.3	双対空間中での物体の移動軌跡	28
3.5	まとめ	32

4	実験	34
4.1	前提条件	34
4.2	実験環境	34
4.3	カメラパラメータの導出	37
4.3.1	カメラの内部モデル	37
4.3.2	カメラの外部モデル	38
4.3.3	キャリブレーション	39
4.4	シーンの詳細	40
4.5	前処理	42
4.6	実験結果	44
4.6.1	差分画像中の移動物体の重心の算出	44
4.6.2	重心平面を用いた移動物体の対応づけ	44
4.6.3	物体の移動軌跡の復元結果	48
5	結論	50
	謝辞	52
	参考文献	53
	研究業績	55
A	実空間と双対空間における性質の証明	56

目 次

1.1	多視点画像	2
2.1	ステレオ視の原理	5
2.2	エピポーラ線	6
2.3	センサ及び車両エージェントの協調	8
2.4	10 個の音響センサによる自動車の追跡	10
3.1	3 次元的にボリュームを持った画像	14
3.2	エピポーラ平面上に並ぶ特徴点	15
3.3	基線と投影点とで構成される平面	17
3.4	物体の移動軌跡	19
3.5	2 直線の交点	21
3.6	4 次元同次座標系 (その 1)	24
3.7	4 次元同次座標系 (その 2)	25
3.8	性質 1	29
3.9	性質 2	29
3.10	性質 3	29
3.11	性質 4	30
3.12	性質 5	30
3.13	応用例 a	31
3.14	応用例 b	31
3.15	応用例 c	32
3.16	双対空間への物体の移動軌跡の射影	33
4.1	実画像撮影システム	35

4.2	同期のとれた入力画像	36
4.3	カメラ内部モデル	37
4.4	カメラ外部モデル	39
4.5	カメラの配置と物体の移動軌跡	41
4.6	正規化相互相関法を用いた移動物体の抽出	43
4.7	画像中での物体の重心の軌跡	45
4.8	移動物体の軌跡	46
4.9	物体の移動軌跡の誤差	47
4.10	復元された物体の 3 次元移動軌跡	49

表 目 次

4.1 本実験におけるカメラパラメータ	40
-------------------------------	----

第 1 章

序論

1.1 研究の目的と背景

カメラなどから撮影された画像を入力画像として，画像中に存在する移動物体を検出し，追跡・認識することは，コンピュータビジョンの研究分野において重要な課題である．これらの研究から得られる画像処理技術は，自動監視システムを始め，人物・車両の自動計測，ヒューマンインタフェース，映像通信と，様々な分野への応用が期待される．

従来提案されてきた移動物体の追跡手法は，単一のカメラから得られる画像を対象としたものがほとんどである．しかし，広範囲かつ複雑なシーンを対象とした場合，単一のカメラで領域全てをカバーすることは困難である．これに対し，シーンを取り囲むように複数台のカメラ（もしくはセンサ）を設置し，それらから得られた画像（以下，多視点画像）を用いた手法 [1, 2, 3, 4] も提案されている．多視点画像を用いる利点としては「単一のカメラでは撮影することが困難であるシーン全域をカバーできる」，「カメラパラメータが既知であれば三角測量の原理より対象物体の 3 次元位置を復元できる」，「オクルージョンが起こった場合，単一の画像のみでは困難となるシーンの解析が可能となる」，「単一の画像に比べ，多くの情報が得られるという情報の冗長性から，誤差や雑音に対してロバストな解析が行える」ということが挙げられる．

一方，多視点画像を扱う際に問題となるのは，それぞれの視点から得られた画像情報の統合方法である．具体的には，それぞれの画像中に存在する物体の対応づけを行うことになる．従来の研究では，ある時間における画像中の物体の見かけの位置や大きさ，色といった特徴量を比較することにより，異なるカメラから撮影された画像間での対応づけを

行っていた。多視点画像とは上でも述べたように、シーンを取り囲むようにカメラを配置し、それらから得られた画像のことを言う(図 1.1)。よって、多視点画像はステレオ画像の拡張と位置づけることができるが、ステレオ画像と大きく異なる点は、ステレオ画像に比べ輻輳角が非常に大きいということである。そのため、画像間に対応すべき対象物体の適合性が乏しくなり、物体の形や色といった見かけの類似度による対応づけは曖昧さを生じてくる。従って、従来提案されているステレオ視の手法をそのまま用いて画像間での物体の対応づけを行おうとすると多大な制約が必要となる。

以上のことをふまえ、本研究では、画像間での物体の対応づけを単なるステレオ視の拡張ではなく、多視点から得られる時系列画像(以下、多視点動画像)での対応づけとして捉える。そして、対象物体の同定を行うと同時に物体の3次元位置を求める手法を提案する。提案する手法において画像間での物体の対応づけに用いる特徴量としては、輻輳角の大きさが原因で適合性に乏しくなってしまう物体の見かけの形、濃淡ではなく、比較的適合性のある見かけの位置とする。そして、時系列画像での見かけの位置を物体の移動軌跡として考え、多視点動画像から得られる軌跡の比較により対象物体の同定を行う。

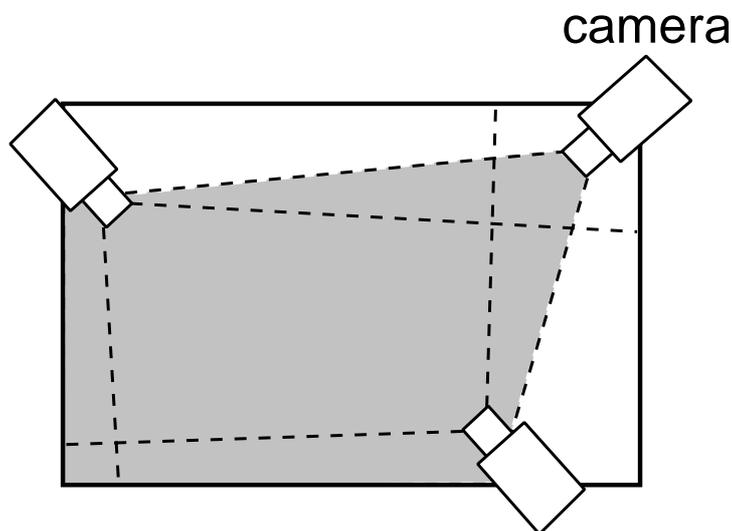


図 1.1: 多視点画像

1.2 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである。

まず第 2 章では、現在提案されているステレオ画像や多視点画像を用いた特徴点の対応づけの手法について述べ、これらの利点と問題点を明らかにする。

次に第 3 章で、本研究で提案する多視点動画像中の移動物体の対応づけ手法について説明し、提案する手法の利点と問題点について述べる。

第 4 章では、本研究で提案した手法を実画像に適用して得られた実験結果を示し、それらについて考察する。

最後に第 5 章で、本研究の結論を述べる。

第 2 章

多視点画像

2.1 はじめに

計算機の記憶容量・処理速度の向上，画像中の物体の追跡・認識や自律移動ロボットの研究の進歩により，近年になって，多視点画像を用いた物体追跡・認識を行う研究がなされるようになった．

本章では，多視点画像の定義とその特徴を述べ，従来の多視点画像を用いた対象物体の対応づけ手法について説明し，それらの特長と問題点を明らかにする．

多視点画像は，1.1節でも述べたように，ステレオ画像の拡張と捉えることができる．そこでまず，多視点画像の定義と特徴について説明を行う前に，ステレオ視の原理と性質，さらに代表的なステレオ画像を用いた対応点探索の手法について説明する．

2.2 ステレオ視の原理と性質

ステレオ視の原理は，図 2.1 に示すように，左右一対のカメラから撮影された画像上での対応点を求め，3次元空間中の座標を求めるというものである [5]．この際，画像面上の3次元座標を求める計算が三角測量という比較的簡単な幾何学原理に基づいているため，対象領域についての知識などを必要としない明解な処理ですむというのが特長である．また，輻輳角 (convergent angle) の大きさに比例して，求められる3次元情報の精度が向上するという性質がある．しかし，輻輳角が大きくなるに従って，各画像間での物体の見た目が変化し，対応づけが困難となる．従って，復元される3次元情報の精度と対応づけの

正確さの間にトレードオフの問題が生じる。

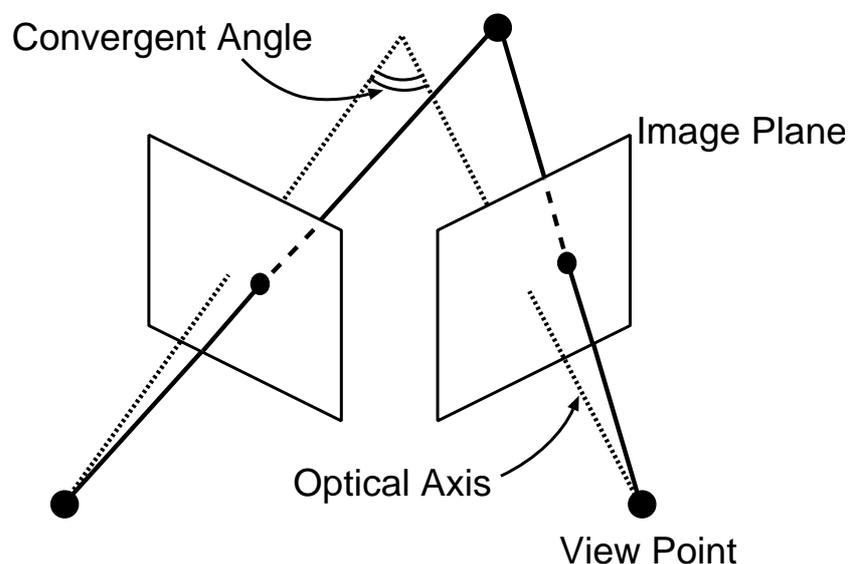


図 2.1: ステレオ視の原理

対応づけの手法として、これまでに様々なものが研究・提案されているが、そのうちの代表的なものをいくつか挙げておく。

テンプレートマッチング：

一方の画像中の小領域(テンプレート)をもう一方の画像に重ね合わせ、小領域の類似度により対応づけを行う方法である。類似度に用いられる値としては画素の輝度値の相関などがある。この手法の問題点是对应づけの探索領域が広くなったり、テンプレートのサイズを大きくとった場合に、計算量が膨大となることである。そのため、対応づけの高速化のアプローチとして、閾値を決めることで対応点探索の計算を打ち切る残差逐次検定法(SSDA: Sequential Similarity Detection Algorithm)[6, 7]などが提案されている。

疎密法：

対応点の候補数を減らすために、一旦解像度の低い画像で対応づけを行い、その後、解像度の高い画像で対応づけを行い直す、いわゆる coarse-to-fine の手法である。この手法は対象物体のモデルがある程度既知であり、少数の点の観測で十分3次元構造が把握できる場合に有効である。

エピポーラ線 :

ここで述べるエピポーラ線 (epipolar line) とは, 対応点探索に直接使うのではなく, 対応点の候補を絞るための拘束条件として用いられる. ステレオ視において, 左右のレンズ中心 O_L と O_R を結ぶ基線 (baseline) と画像面上の点 P_L とで決定される平面がもう一方の画像面と交差してできる直線をエピポーラ線と言う (図 2.2). ここで, エピポーラ線を形成する際に用いられた点 P_L に対応するもう一方の画像面上での点 P_R は, このエピポーラ線上に存在するという性質がある. この拘束条件を用いることで, 画像間での対応点探索問題は 1 次元での探索問題へと簡単化することができる.

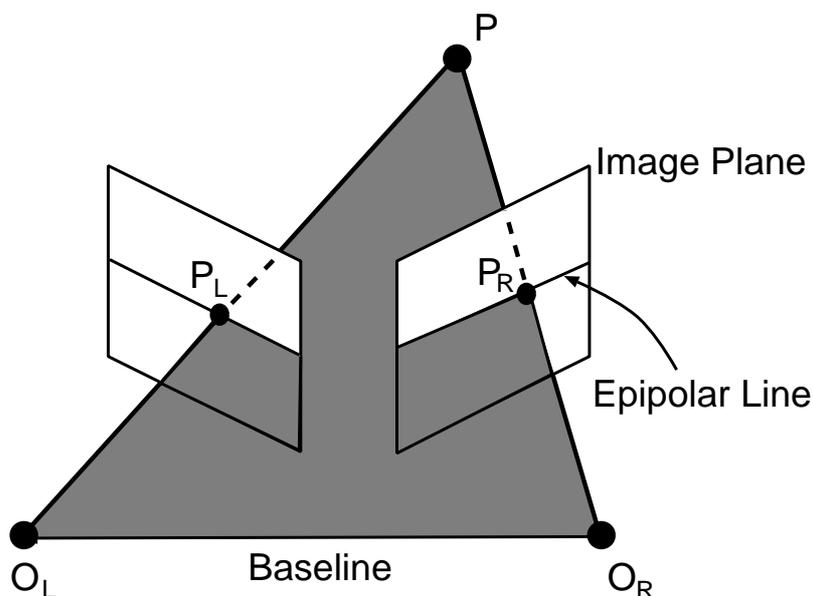


図 2.2: エピポーラ線

以上がステレオ視の原理と性質, 及びその代表的な対応づけの手法である.

次節では, ステレオ画像の拡張と捉えることができる多視点画像をステレオ画像との比較を行いながら説明する.

2.3 多視点画像の定義と特徴

まず，本研究で扱う多視点画像という単語を以下のように定義する．

[多視点画像の定義]

多視点画像とは，図 1.1のようにシーンを取り囲むように配置した複数のカメラから得られた画像のことを言う．

図 1.1を見てもわかるように，多視点画像はステレオ視において輻輳角を大きくとったカメラから得られたものであり，ステレオ画像の拡張と位置づけることができる．

多視点画像を用いる利点としては，

- 単一のカメラ，もしくはステレオ視では撮影することが困難であるシーン全域をカバーできる．
- カメラパラメータが既知であれば，ステレオ画像の場合と同様に三角測量の原理より対象物体の 3 次元位置を復元できる．
- オクルージョンが起こった場合，単一の画像，もしくはステレオ画像のみでは困難となるシーンの解析が可能となる．
- 単一の画像に比べ，多くの情報が得られるという情報の冗長性から，誤差や雑音に対してロバストな解析が行える．

ということが挙げられる．

多視点画像を用いる際に問題となるのは，ステレオ画像の場合と同様に各画像間での特徴点の対応づけである．多視点画像は輻輳角が非常に大きくなるように配置されたカメラから得られた画像であるから，画像間で対応すべき対象物体の見かけの形，濃淡といった特徴量が大きく変化し，適合性に乏しくなる．そのため，前節で説明したようなステレオ画像に対して用いられる見かけの類似度による対応づけをそのまま多視点画像に適用すると，対応づけに曖昧さが生じてくる．従って，多視点画像間で従来提案されているステレオ視の手法をそのまま用いると多くの制約が必要となる．

次節では，多視点画像を用いた実際の研究例を挙げ，その特長と問題点について述べる．

2.4 多視点画像を用いた従来の研究

本節では，多視点画像を用いた従来の研究のいくつかを挙げ，その特長と問題点を明らかにする．

各カメラでの撮影領域が重複している研究の例として，西尾らの研究 [2, 3] がある．西尾らは交差点に複数台のカメラを配置し，交差点を通過する自動車の追跡を行うシステムを開発した．このシステムでは，

1. カメラから撮影された画像を解析し車両の検出を行うセンサ・エージェントが，検出された個々の車両を表す車両エージェントを動的に生成し，
2. 車両エージェントがセンサ・エージェント群と通信・情報交換しながら車両の追跡を行う．

というシステム構成を採っている (図 2.3) ．

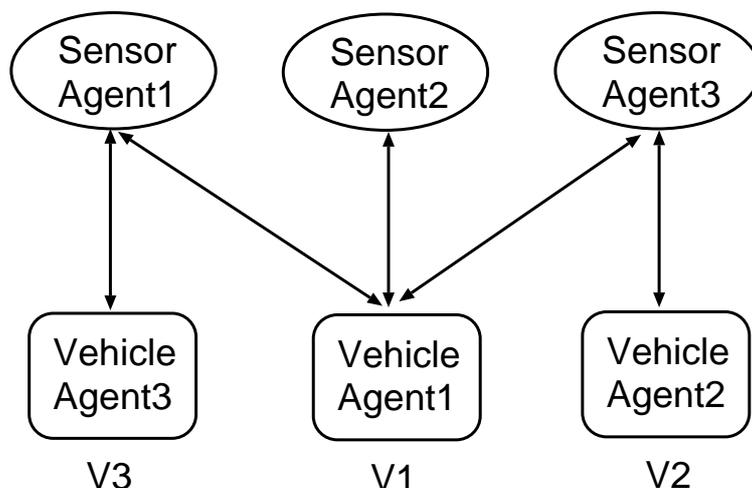


図 2.3: センサ及び車両エージェントの協調

各カメラから得られた画像間での物体の対応づけは，センサ・エージェントが行う．対応づけに用いる特徴量としては，車両の 3 次元位置，車両タイプ，大きさ，色としている．車両の 3 次元位置・タイプ・大きさは，あらかじめ用意した車両のワイヤーモデルを画像に当てはめることにより求めている．よって，車両を 3 次元的な大きさを持った物体

として扱うことができ、異なる方向から観測される情報を有効に利用することができる。反面、車両モデルを用いることで対象物体が大幅に限定されてしまっている。

各カメラでの撮影領域が重複していない場合では、和田らによる研究 [4] がある。この場合、撮影領域を重複させる必要がないので、少数台のカメラでかなり広範囲の領域をカバーできる、しかし、この論文では対応づけに用いる特徴量については述べられていない。また、重複撮影領域を有しないようにカメラを配置することで、物体の移動情報が未知な領域が存在し、その領域での物体の運動に対し「対象物体は他の対象物体を追い越すことはない(順序性)」、「ある観測点で観測された物体は規定の時間内に次の観測点で観測される(時間性)」、「対象物体はその進行方向を大きく変えない(方向性)」、「対象物体は移動に伴ってその個数が変化することはない(排他性)」といった様々な制約が必要となる。

画像を扱ってはいないが、複数の音響センサを用いた研究として、Durfee らによる自動車追跡システム DVMT (Distributed Vehicle Monitoring Testbed)[1] がある。この研究では音響センサを使うということで入力される情報は異なるが、各センサから得られた情報の対応づけという問題は、画像を用いた場合と同等であると考えることができる。この DVMT では、まず、各観測ステーションが音響センサから得られたデータに基づき、それによってカバーされる局所領域内の自動車の数や運動を認識する。自動車が局所領域 A1 から局所領域 A2 に移動すると、A1 を担当する観測ステーションから A2 を担当する観測ステーションにそれまでの運動情報が伝えられる。図 2.4 に互いに重なりあった矩形領域を受け持つ 10 個の音響センサを用いた自動車の追跡結果を示す。黒丸の大きさは信号の強度を表し、上の軌跡はゴーストによる偽の軌跡を表す。

音響センサを用いる利点としては、物体の 3 次元位置を簡単に得ることができ、物体の対応づけが容易であるということが挙げられる。しかし、センサの特性により偽の軌跡が生じたり、実際に自動監視システムなどに利用するには物体の位置しか情報として得ることができないという問題がある。従って、音響センサはそれ単独で用いるのではなく、他のセンサと合わせて利用するのがよいと言える。

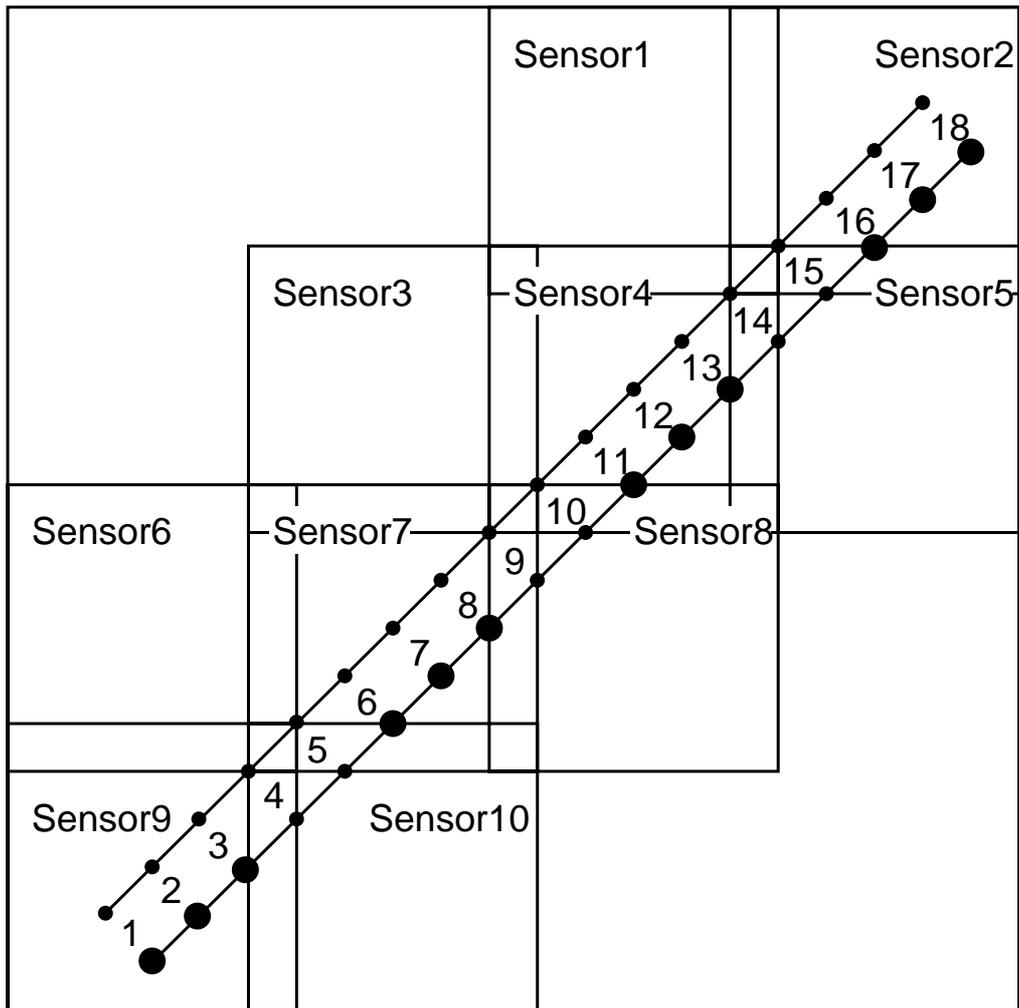


図 2.4: 10 個の音響センサによる自動車の追跡

2.5 まとめ

本章では，多視点画像の定義を述べた．また，多視点画像はステレオ画像の拡張と位置づけることができることを明らかにした．多視点画像，ステレオ画像とも問題となるのは異なるカメラから撮影された画像間での物体の対応づけであるが，ステレオ画像での対応づけの手法をそのまま多視点画像に利用すると様々な制約が必要となり，現実的ではない．更に，多視点画像を用いた研究をいくつか挙げたが，どれも制約条件が強いため，現実性に欠けている．

次章では，これらのことをふまえ，多視点から得られる時系列画像を用いた新たな対応づけの手法を提案する．

第 3 章

多視点動画像を用いた対象物体の対応づけ

3.1 はじめに

前章で述べたように，多視点画像中の物体の対応づけには様々な制約条件が必要となる．その原因は，従来提案されているステレオ視の手法をそのまま用いて画像間での物体の対応づけを行おうとするところにある．ステレオ視における対象物体の対応づけアルゴリズムは，輻輳角が比較的小さな場合を想定して作られている．輻輳角が小さければ，それぞれのカメラから得られた画像中の物体の見かけの形・濃淡の類似度は高く，それらの特徴量をそのまま対応探索のパラメータとして利用できる．

一方，多視点画像のように輻輳角を大きくとったカメラから得られた画像では，画像中に写っている物体の見かけは大きく異なる．従って，多視点画像間で見かけの類似度に基づく対応づけを行うと，得られた対応づけの結果に曖昧さが生じてくる．

このように，多視点画像においてステレオ視の手法をそのまま用いて物体の対応づけを行ったものは，信頼性に欠ける．従来の研究では，対象となる環境や物体に対し，様々な制約を付加することで，対応づけの曖昧さを除去していた．本研究では画像間での物体の対応づけを単なるステレオ視の拡張ではなく，多視点から得られる時系列画像間での対応づけとして捉える．また，対応づけに際し，各視点から得られた類似性の低い見かけの特徴量は使用しない．そうすることにより，環境や対象物体に対する制限を取り除くことができ，あらゆる状況において柔軟に対応できる．以下で，本研究で提案する新たな対応づけ手法について説明を行う．

3.2 多視点動画像

まず，はじめに本節で議論する多視点動画像の定義を行う．

[多視点動画像の定義]

シーンを取り囲むように配置した複数のカメラから得られた時系列画像を総称して，多視点動画像という．

上記の定義からわかるように，多視点動画像はステレオ画像・多視点画像の拡張であり，また，時系列画像の拡張とも言える．従って，ステレオ視や多視点画像と同様に，異なるカメラから得られた画像間で物体の対応づけがとれれば，三角測量の原理により，物体の3次元位置を復元できる．

また，時系列画像の拡張であると考えれば，時間情報を用いた対応づけが行える．具体的には対象物体をある一定時間観測することにより得られる情報である．物体を一定時間観測することにより得られる情報としては，物体の位置や速度などの情報や，その物体が行っている運動（ジェスチャー）やその物体が何であるかといったものが挙げられる．前の2つは比較的容易にその情報を取り出すことが可能であるが，残りの2つは，物体に小さな光源をつけたり，物体の詳細なモデルを当てはめたりと処理が複雑になる．実際のシーンに現れるような多数の移動物体が存在する場合，そのような詳細な運動解析は現実的ではない．更に，そのような解析は，物体検出・追跡などよりもむしろ解決の難しい問題である．従って，本研究では人物の手足など細かな運動には着目せず，時間全体でグローバルな物体の移動軌跡に着目し，多視点動画像の解析を行う．そこで，まず従来提案されている時系列画像を用いた物体の対応づけ手法のいくつかを挙げ，その特長，問題点を述べる．

時系列画像を用いた軌跡に基づく対応づけとして，山本の研究 [8] がある．この手法はまず，直線的にカメラを動かすことによって，得られた画像を時間軸方向に重ね，3次元的にボリュームを持った空間を形成する（図 3.1）．これを時空間画像と呼ぶことにする．シーン中の物体が全て静止物体ならば，3次元中に存在する特徴点はこの時空間画像中で直線上に並ぶ（図 3.2右）．従って，各画像間での特徴点の対応探索問題が，時空間画像内の直線検出問題へと単純化される．

例えば，図 3.2左のような撮像系を考える．ここで，カメラの内部構造としては，単レ

レンズで、焦点距離が f と固定であるとする。そして、レンズ中心の座標が $(at, 0, 0)$ と X 軸上を単位時間毎に移動すると考える。この時、3次元空間中に静止している特徴点 (X, Y, Z) の投影面上での座標 (x, y) は次のようになる。

$$(x, y) = \left(\frac{X - at}{Z} f, \frac{Y}{Z} f \right)$$

従って、時空間空間でのこの投影点 (x, y) の軌跡は、水平方向のエピポーラ平面 $y = \frac{Y}{Z} f$ 上に全て存在することになる。更に、 x 座標は t を変数とする線形な関数、つまり直線の式で表されているので、投影点は全て直線上に並ぶ。

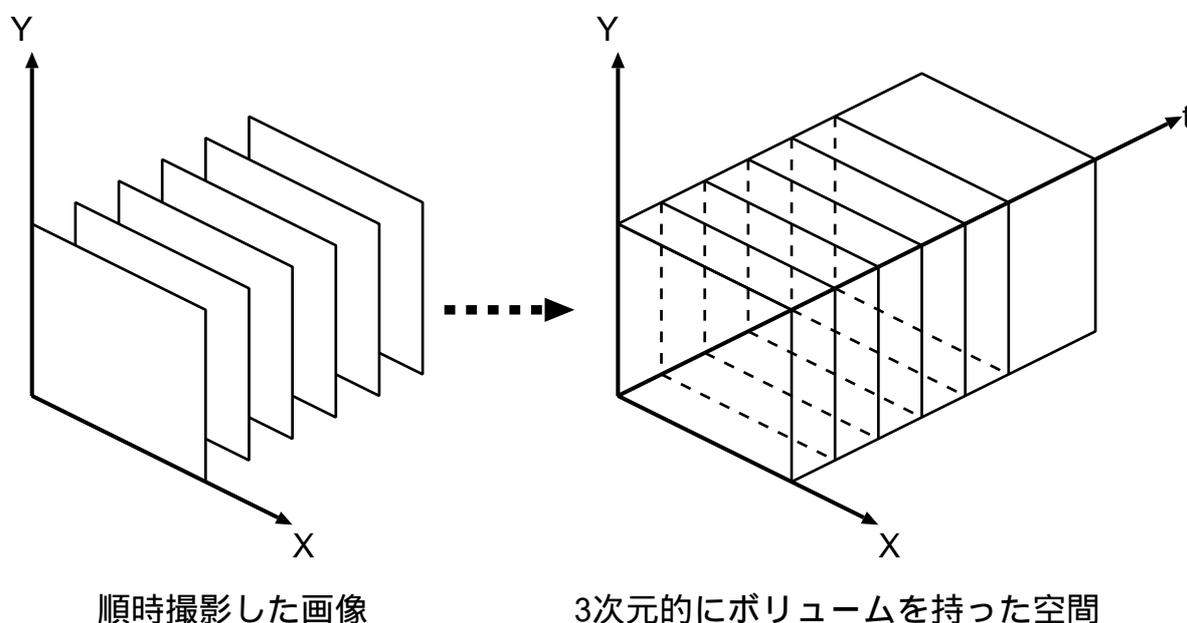


図 3.1: 3次元的にボリュームを持った画像

以上のことから、時空間画像は、カメラの軌跡情報を含んだものであると言える。このことは、カメラが直線以外の運動を行った場合を考えると、よりはっきりとする。カメラが半径 r 、角速度 ω で円運動を行った場合、投影点の軌跡は以下の式になる。

$$(x, y) = \left(\frac{-X \sin(\omega t) + Z \cos(\omega t)}{r - X \cos(\omega t) - Z \sin(\omega t)} f, \frac{Y}{r - X \cos(\omega t) - Z \sin(\omega t)} f \right)$$

この場合、投影点は時空間画像中で螺旋状に並ぶ。

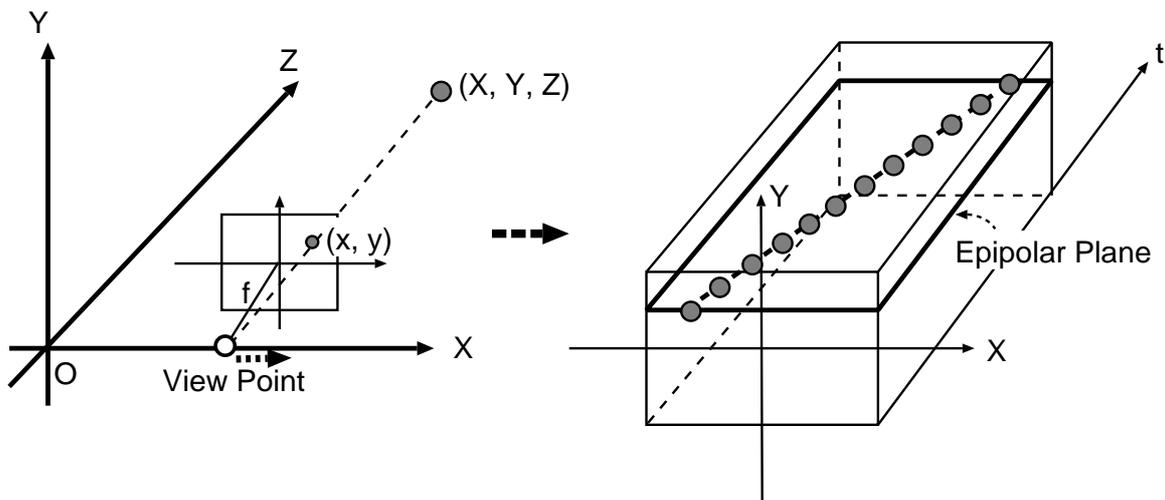


図 3.2: エピポーラ平面上に並ぶ特徴点

これは、カメラを固定して、シーン中で物体が運動する場合にも当てはまる。物体が直線状に運動すると仮定されてるシーン（例えば、高速道路など）においては有効な対応点探索の手法となる。

逆に、時系列画像間での特徴点の対応が既知の場合における、カメラ運動と特徴点の3次元位置を同時に求める優れた手法として因子分解法 [9, 10, 11, 12] がある。この手法は、カメラの運動や物体の形状についての情報を必要とせず、また、数値計算的に安定な行列の特異値分解を用いるため、得られる解は極めて安定である。従って、雑音に対して、ロバストな解析が行える。また、オクルージョンなどにより、失われたデータを復元する手法についても述べられている。最近では、文献 [12] で複数物体を扱うことができる手法が提案されている。しかし、計算量や物体数の決定法などが定かではなく、さらなる研究の余地がある。

以上、時系列画像を用いた研究を2つほど挙げたが、前で紹介した研究は時系列画像中の軌跡の情報を用いているという点で、本研究に通ずるものがある。しかし、カメラ（もしくは物体）は直線運動を行わなければならないという強い制約により、自動監視システムなどへの応用を考えると現実的ではない。

そこで、本研究では、多視点から得られる時系列画像“多視点動画”を用いて、より一般的な環境において適応可能である物体の対応づけ手法を提案する。

3.3 移動軌跡を用いた対象物体の対応づけ手法

3.3.1 本手法の構築にあたっての方針

これまで述べてきたように，多視点画像間での物体の対応づけには様々な制約が必要となる．本研究は，画像間での物体の対応づけを行うのに，厳しい制約を必要としない，より一般的なシーンで適用可能な手法を開発することを目指している．そのため，各視点から得られた画像中に存在する物体の類似度の低い見かけの特徴量は使用しない．また，移動物体の細かな動きの解析には着目せず，時間的にグローバルな動きを用いて画像間での物体の対応づけを行う．

以上のことをまとめると，本研究で目指している手法は次のような方針のものとなる．

- 自動監視システムなど，より一般的なシーンで適用可能とするため，環境に対する制約は行わない．
- 対象物体は剛体・非剛体を問わない．また，物体の細かな動きについては考慮せず，時間的にグローバルな物体の軌跡を用いた対応づけを行う．
- それぞれのカメラから得られた画像間で対応づけを行う際に，適合性に乏しい物体の見ための形，色といった特徴量は用いず，比較的類似度が高い見かけの位置を用いる．

また，以下の2つを前提条件とした．

- それぞれのカメラの位置，パラメータは既知であるとする．
- 各カメラから得られた動画像中での物体の追跡は行えてるものとする．

このような方針，前提条件に基づき，本研究では多視点動画像間での物体の対応づけ手法を構築した．以下で，その提案手法について詳しく説明していく．

3.3.2 対応づけに用いる特徴量

本研究では，多視点動画像間での物体の対応づけを行う際に用いる特徴量として，画像中の物体の見ための位置を用いる．この際，異なる視点から得られた画像中の物体の見た

めの位置をどのようにして比較するかが問題となる．比較を行うためには，それぞれの画像中の物体の見ための位置を，対応づけを行う視点どうしで共通の単位に揃えてやらなければならない．

本研究では，そのための方法として，それぞれの視点どうしを結んだ直線（基線）と画像中の投影点とで構成される平面を比較の対象とする．このようにすることによって，各視点での物体の位置は3次元空間中の平面のパラメータへと変わり，これらのパラメータを比較することで，物体の対応づけが行える．図3.3を見るとわかるように，平面のパラメータを比較することは2.2節で説明したステレオ視におけるエピポーラ平面を比較していることになる．

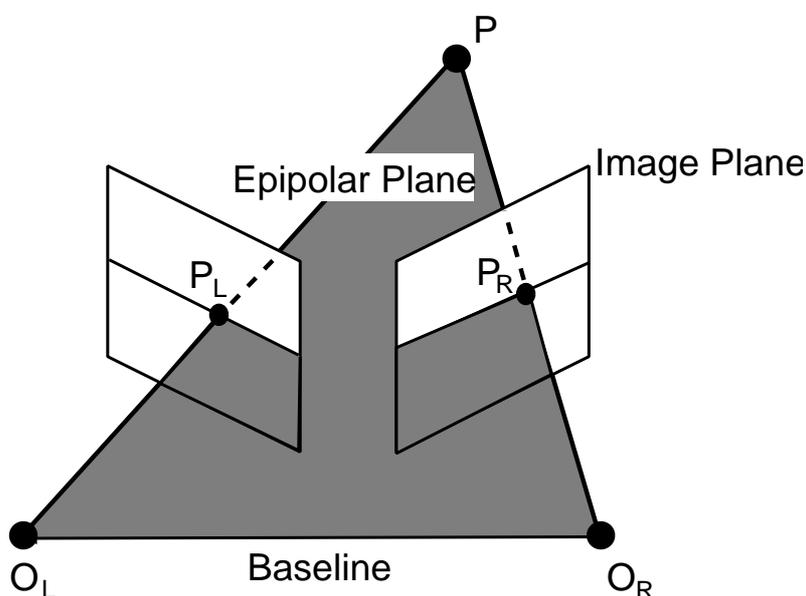


図 3.3: 基線と投影点とで構成される平面

これまで何度も述べてきたように，ステレオ視と多視点画像との違いは，その輻輳角の大きさであり，それによって変わる各視点から得られた物体の見かけの類似度の度合である．ステレオ視における対応点探索は，各画像間での見ための特徴量を比較し，エピポーラ線を拘束条件として用いていた．多視点画像を用いた手法においては，その輻輳角の大きさから，見ための特徴量は適合性に欠け，そのために生じる対応づけの曖昧さを取り除くために対象物体に制約をつけていた．本研究では多視点動画から得られるエピポーラ平面のパラメータを時間軸に沿って並べ，それを物体の移動軌跡と捉え，各視点から得ら

れた物体の移動軌跡の比較により，物体の対応づけを行う．

今，2台のカメラ位置がそれぞれ $C_1(c1_x, c1_y, c1_z)$, $C_2(c2_x, c2_y, c2_z)$ のように与えられているとする．この時，一方のカメラから得られた画像中の投影点 $P(p_x, p_y, p_z)$ と C_1, C_2 で構成される平面の方程式は以下ようになる．

$$\alpha(X - p_x) + \beta(Y - p_y) + \gamma(Z - p_z) = 0 \quad (3.1)$$

ここで，

$$\alpha = (c2_y - p_y)(c1_z - p_z) - (c1_y - p_y)(c2_z - p_z)$$

$$\beta = (c1_x - p_x)(c2_z - p_z) - (c2_x - p_x)(c1_z - p_z)$$

$$\gamma = (c2_x - p_x)(c1_y - p_y) - (c1_x - p_x)(c2_y - p_y)$$

である．

画像中の物体の追跡は行えているものと仮定してあるので，一方の視点 O_1 から得られた画像中での投影点 P_1 でできる平面とある比較の基準となる平面（以下，基準平面）とのなす角度 θ を時間軸上に並べることによって，物体の移動軌跡を描くことができる（図 3.4）．上記で求められた平面の法線ベクトルを \vec{a} ，基準平面の法線ベクトルを \vec{b} とすると， θ は，

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \right) \quad (3.2)$$

となる．

この時，もう1方の視点 O_2 から得られた画像中に同一の特徴点が投影されているならば，その投影点 P_2 で構成される平面も同一の軌跡を描くことになる．しかし実際には，多視点動画像では各視点から観測される物体の見え方は大きく異なり，同一の特徴点を確実に観測できる保証はない．また，物体を構成している特徴点は，物体の進行方向が変わることによって隠蔽されたり，逆に新たな特徴点が出現したりと，物体が画像面上に写っている間を通して利用できるものではない．そこで，本研究では物体を構成する特徴点を用いて平面を構成するのではなく，物体の見ための重心を用いて平面を構成することにする．以下，この見た目の物体重心と各視点とで構成される平面のことを“重心平面”と呼ぶ．

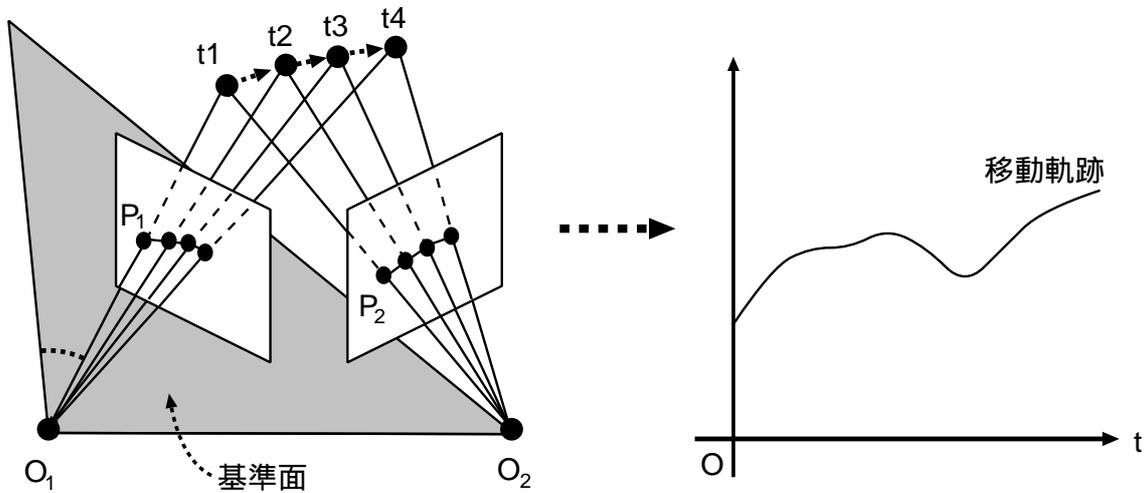


図 3.4: 物体の移動軌跡

重心平面は，重心自体が物体のおおよその存在位置や大きさを表しているのので，物体のある特徴点で構成される平面に比べ，その物体をよく示していると言える．また，物体が観測されている間は，安定して常に利用できる特徴量である．しかし，重心を使った場合にもいくつか問題はある．まず，多視点動画像間ではそれぞれの視点で物体の見え方が大きく変化し，特に人物などの非剛体の場合には，同一の視点から見た場合でもその重心位置は時間の流れにしたがって画像面中で滑らかに動くとは限らない．また，物体どうしの重なりやオクルージョンが起こった場合にも重心の位置はずれてくる．更に，物体重心がエピポーラ平面内を移動する時には対応が見つからない．これは，エピポーラ平面を使えば必ず生じる問題である．

しかし，本研究では物体の移動軌跡全体を見ることにより対応づけを行うので，上記のような理由である短い時間領域では対応づけができない場合でも，移動軌跡全体を見ることにより，画像間での物体の対応づけが可能となる．

具体的な物体の移動軌跡の対応づけに用いる計算は次のようになる．

$$Err = \sum_{i=1}^n (C1_{orbit} - C2_{orbit})^2 \quad (3.3)$$

ここで， $C1_{orbit}$ ， $C2_{orbit}$ はそれぞれカメラ 1，カメラ 2 から撮影された物体の見た目の重心の移動軌跡から構成された重心平面と基準平面とがなす角度である．それらの値の時

間 $t = 1$ から $t = n$ までの誤差の 2 乗をとり，得られた値 Err が小さいほど移動軌跡が類似しているということになる．実際に対応づけを行う際には，1 画像中に複数の物体が存在するので，それぞれに対して式 (3.3) を適用する必要がある．そのようにして得られた結果 Err から判断し，対応づけを行う．具体的には次のような処理を行う．

1. 得られた結果 Err がある閾値以下で，各画像中の物体どうして 1 対 1 に対応がつく場合は，対応づけを行う．対応がつかずに残った物体は，そのまま保留する．
2. 得られた結果 Err がどれもある閾値以上の場合は対応づけが困難であると判断し，対応づけを保留する．
3. 得られた結果 Err がある閾値以下で，1 対多，もしくは多対多といった対応がつく場合は，対応づけを保留する．

次節では，対応づけられた物体の移動軌跡から元の物体の 3 次元移動情報を復元する方法について説明する．

3.3.3 3 次元移動軌跡の復元

まず，2 つの視点から得られた画像間で対応づけられた物体の画像面上での重心位置と視点とを結んだ直線 L_1, L_2 の式をそれぞれ以下のようにおく．

$$\frac{X - x_1}{\alpha_1} = \frac{Y - y_1}{\beta_1} = \frac{Z - z_1}{\gamma_1} \quad (3.4)$$

$$\frac{X - x_2}{\alpha_2} = \frac{Y - y_2}{\beta_2} = \frac{Z - z_2}{\gamma_2} \quad (3.5)$$

これら 2 本の直線の 3 次元空間中での交点が求める物体の 3 次元位置ということになる．しかし，実際には重心位置の誤差が原因となり，この 2 直線が交わらず，いわゆるねじれの位置になることが多い．そこで，この 2 直線上の点 Q_1, Q_2 の距離が最小となる時の Q_1, Q_2 の中点を 2 直線の交点 P として近似する (図 3.5) ．

式 (3.4) = t_1 ，式 (3.5) = t_2 とおくと，

$$Q_1 = (\alpha_1 t_1 + x_1, \beta_1 t_1 + y_1, \gamma_1 t_1 + z_1)$$

$$Q_2 = (\alpha_2 t_2 + x_2, \beta_2 t_2 + y_2, \gamma_2 t_2 + z_2)$$

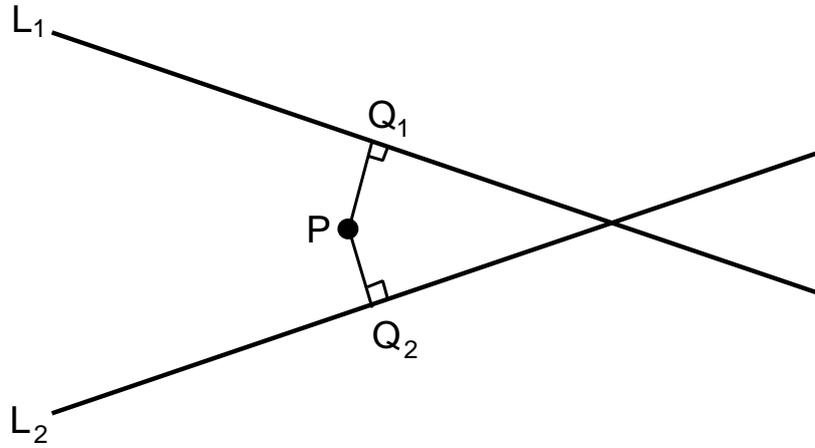


図 3.5: 2 直線の交点

とおける．この 2 点 Q_1, Q_2 でできるベクトル $\overrightarrow{Q_1Q_2}$ と式 (3.4), (3.5) の 2 直線とが直交する位置が，2 直線の距離が最小となる．従って，

$$(\alpha_2 t_2 + x_2 - \alpha_1 t_1 - x_1)\alpha_1 + (\beta_2 t_2 + y_2 - \beta_1 t_1 - y_1)\beta_1 + (\gamma_2 t_2 + z_2 - \gamma_1 t_1 - z_1)\gamma_1 = 0$$

$$(\alpha_2 t_2 + x_2 - \alpha_1 t_1 - x_1)\alpha_2 + (\beta_2 t_2 + y_2 - \beta_1 t_1 - y_1)\beta_2 + (\gamma_2 t_2 + z_2 - \gamma_1 t_1 - z_1)\gamma_2 = 0$$

となる．これらから求める点 P は以下のようになる．

$$P = \left(\frac{x_1 + x_2 + t_1 \alpha_1 + t_2 \alpha_2}{2}, \frac{y_1 + y_2 + t_1 \beta_1 + t_2 \beta_2}{2}, \frac{z_1 + z_2 + t_1 \gamma_1 + t_2 \gamma_2}{2} \right) \quad (3.6)$$

但し，

$$a = \alpha_1^2 + \beta_1^2 + \gamma_1^2$$

$$b = \alpha_2^2 + \beta_2^2 + \gamma_2^2$$

$$c = \alpha_1 \alpha_2 + \beta_1 \beta_2 + \gamma_1 \gamma_2$$

$$d = (x_2 - x_1)\alpha_1 + (y_2 - y_1)\beta_1 + (z_2 - z_1)\gamma_1$$

$$e = (x_2 - x_1)\alpha_2 + (y_2 - y_1)\beta_2 + (z_2 - z_1)\gamma_2$$

$$t_1 = \frac{bd - ce}{ab - c^2}$$

$$t_2 = \frac{cd - ae}{ab - c^2}$$

である。この式により，3次元空間中での物体の移動軌跡を復元できる。

3.4 重心平面の3次元位置情報を利用した対応づけ

多視点動画像間での物体の対応づけは，前節で説明したように物体の見かけの重心と各視点とを結んだ平面である重心平面を用いて行う。具体的には式(3.1)を用いて，重心平面と基準平面との角度を求め，それを物体の移動軌跡と捉え，軌跡の比較を行い，物体を対応づける。ここで用いられる平面のなす角度は，その原理から2つの視点の間でだけ有効な値である。従って，カメラ3台以上から得られた物体の移動軌跡を対応づける際に，そのような値をそのまま用いて他のカメラから得られた画像間での物体の対応づけを行うことはできない。つまり，上記の手法では，物体の対応づけは一度に2視点でしか行えないことになる。

そこで，本節では式(3.1)を変形することによって，重心平面の3次元情報を含んだ移動軌跡を求める。本研究ではこの3次元情報を含んだ移動軌跡を使って，3視点以上での物体の対応づけを同時に行う手法を提案するまでには至っていない。しかし，本節で説明する平面の3次元位置情報を利用した対応づけに用いる“双対空間”と呼ばれるものは，射影幾何学的に興味深い性質を持っている。また，この双対空間を使うことにより，直感的に理解しにくい3次元平面が点へと変換され，問題の見通しがよくなる。そこで本節では，多視点動画像中の物体の対応づけを一度に行い，それと同時に物体の3次元移動軌跡も求めることが可能であると考えられる，重心平面の3次元情報を用いた移動軌跡について説明する。

3.4.1 重心平面の3次元位置

式(3.1)で用いている平面の方程式は，よく利用される一般的な3次元平面の式である。この平面の方程式は両辺を適当な数字で割ることにより，いくつかのパターンの式となる。特に，式(3.1)を以下のような式に変形した場合，平面の法線ベクトル $\vec{d}' = (\alpha', \beta', \gamma')$ は，ベクトル情報だけでなく，原点からの距離情報を持ったものとなる。

$$\alpha'X + \beta'Y + \gamma'Z + 1 = 0 \tag{3.7}$$

このように変形して求められた \vec{a}' を用いてこれまでの手法と同様に基準平面との比較を行うには、これまでのように平面の角度を用いるのではなく、

$$d = |\vec{a}' - \vec{b}'| \quad (3.8)$$

といったベクトル間での減算をし、その大きさを求めるといった方法になる。なぜならこれまでの手法のように平面の角度をそのまま用いたのでは、ベクトル内に包含されている平面の3次元情報を利用することができないからである。このことは、次節で述べる“双対空間”を用いることで直観的に理解することができる。

3.4.2 双対空間

本節では双対空間の定義とその性質について述べる。双対空間は、4次元同次座標系をもとにして考えられたものであるので、まず4次元同次座標系について説明する [13, 14]。

4次元同次座標系

射影幾何学において通常の座標に対し、アフィン変換など様々な変換を行う際に、演算の線形性を保つため通常の座標より1次元多い座標を考える場合がある。この1次元多い座標を“同次座標”と呼ぶ。

通常座標系が3次元実空間である場合、その空間中の座標 (x, y, z) に対する同次座標は0でない任意のスカラー値 w を用いて $(X, Y, Z, w) \equiv (wx, wy, wz, w)$ と表わされる4次元の座標である(図3.6)。 w は任意であるから、1つの通常座標 (x, y, z) に対する同次座標 (wx, wy, wz, w) は4次元の同次座標系内において、原点と座標 (wx, wy, wz, w) を結ぶ直線上(図3.6中L1)に無数に存在する。逆に、同次座標 (X, Y, Z, w) に対する通常座標は $(X/w, Y/w, Z/w, 1)$ として一意に決まる。

以上より、通常の3次元空間は、4次元同次座標系内において、 $w = 1$ となる特別な空間と考えることができる。

3次元双対空間

4次元同次座標系 $XYZw$ においてある点の座標 (a, b, c, d) が与えられた時、この座標を原点を通る直線の方角ベクトルと見るか、あるいは原点を通る超平面の方角ベクトルと見るかで $w = 1$ となる空間との交わりが2通り考えられる(図3.7)。

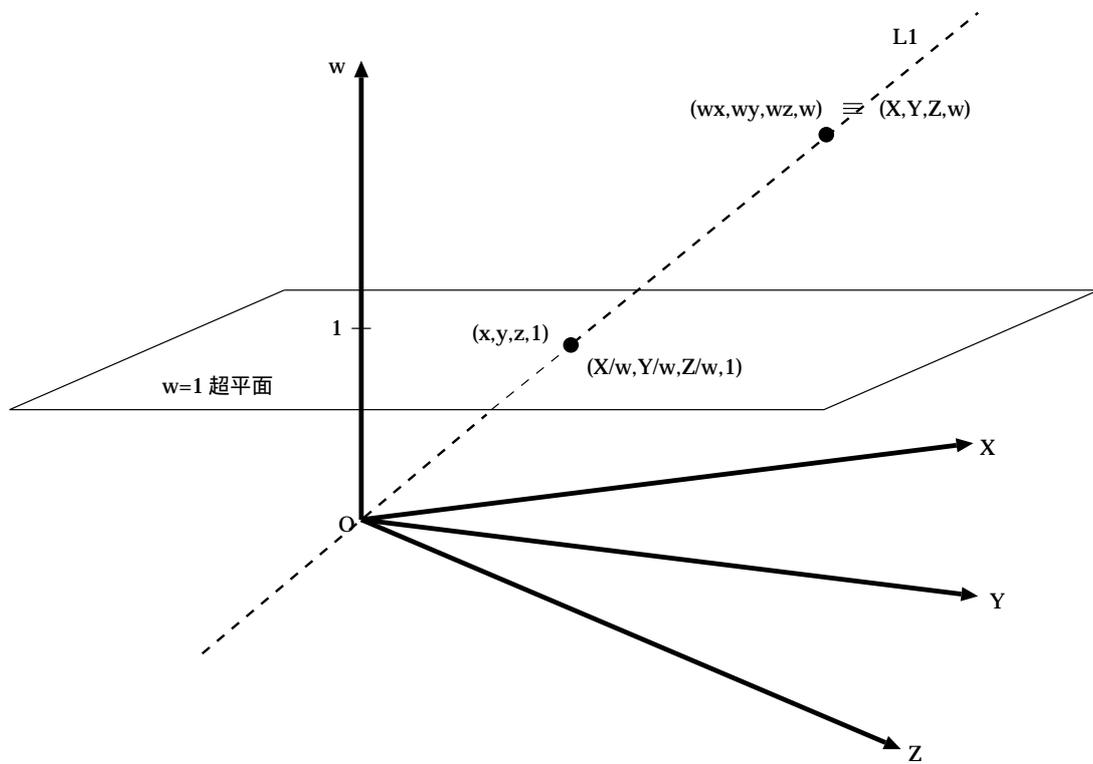


図 3.6: 4次元同次座標系 (その1)

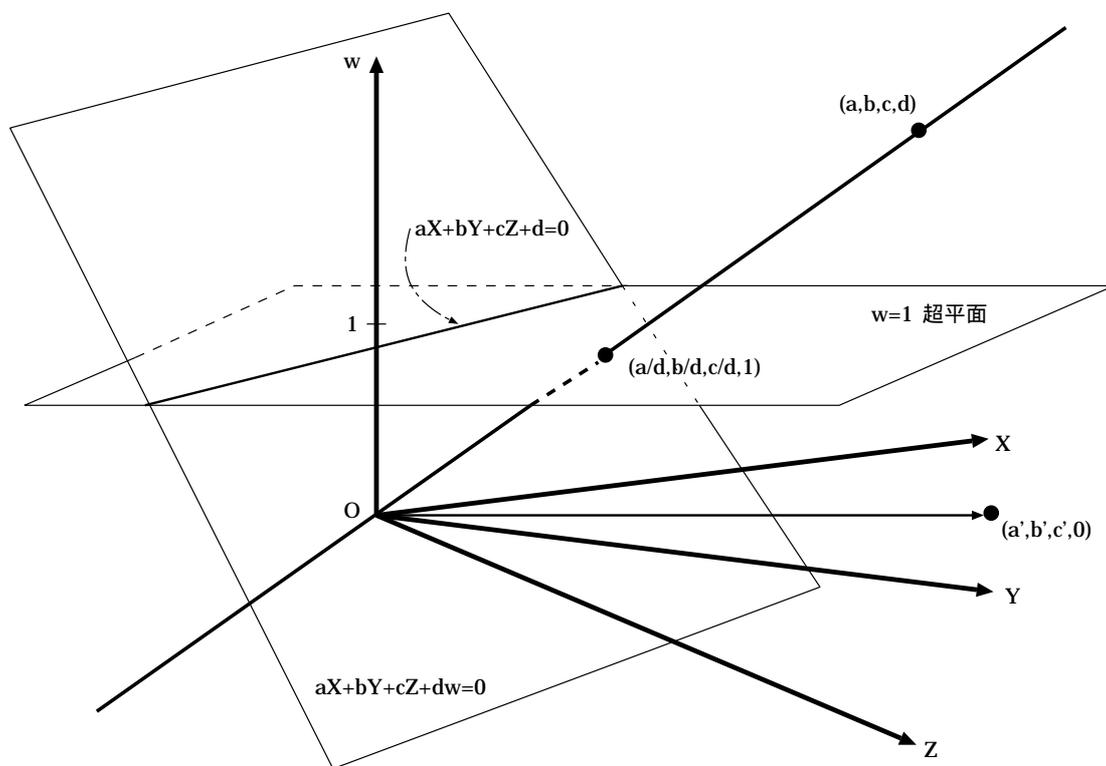


図 3.7: 4次元同次座標系 (その2)

つまり，座標 (a, b, c, d) をその点と原点を通る直線とした場合， $w = 1$ 超平面との交わりは点 $(a/d, b/d, c/d, 1)$ となり， $w = 1$ である 3 次元空間内での 3 次元の点 $(a/d, b/d, c/d)$ となる．

また，座標 (a, b, c, d) を原点を通る超平面の法線ベクトルとした場合，この超平面と $w = 1$ 超平面との交わりは $aX + bY + cZ + d = 0$ となり， $w = 1$ である 3 次元空間内では平面となる．なお，図 3.7 は 4 次元空間を 2 次元上の図として描いているため，平面が実際には空間であり，直線が実際には平面であることに注意しなければならない．

このような 2 通りの射影から，4 次元同次座標系を介して，3 次元実空間とは双対な関係を持つ空間“双対空間”を定義することができる．以下に，まず点と平面に関する定義を述べる．なお，実空間内の座標系を XYZ ，双対空間内の座標系を UVW とする．

点から平面への変換：

実空間中の点の座標 (x_0, y_0, z_0) を，同次座標 (wx_0, wy_0, wz_0, w) とし，この点を法線方向として原点を通る超平面と， $w=1$ なる超平面との交わりである平面 $x_0X + y_0Y + z_0Z + 1 = 0$ を双対空間中の平面 $x_0U + y_0V + z_0W + 1 = 0$ とする．

平面から点への変換：

実空間中の平面の方程式 $aX + bY + cZ + d = 0$ の係数を同次座標 (a, b, c, d) とみなし，原点とこの点を通る直線と， $w = 1$ 超平面との交わりである点 $(a/d, b/d, c/d, 1)$ を双対空間中の点 $(a/d, b/d, c/d)$ とする．

以上の定義から，直線に関しては以下のように考えられる．

実空間中の直線

$$\frac{X - x_0}{a} = \frac{Y - y_0}{b} = \frac{Z - z_0}{c}$$

は 2 点 (x_0, y_0, z_0) と (x_1, y_1, z_1) ($= (at + x_0, bt + y_0, ct + z_0) t \neq 0$) を通り，双対空間内では平面 $x_0U + y_0V + z_0W + 1 = 0$ と $x_1U + y_1V + z_1W + 1 = 0$ の交線と考えられるので，これに双対な直線の式は，

$$\frac{U - u_0}{\alpha} = \frac{V - v_0}{\beta} = \frac{W - w_0}{\gamma}$$

但し ,

$$\begin{aligned}(\alpha, \beta, \gamma) &= (bz_0 - cy_0, cx_0 - az_0, ay_0 - bx_0) \\(u_0, v_0, w_0) &= (0, c/\alpha, -b/\alpha) \quad (\alpha \neq 0 \text{ の時}) \\&\text{or} = (-c/\beta, 0, a/\beta) \quad (\beta \neq 0 \text{ の時}) \\&\text{or} = (b/\gamma, -a/\gamma, 0) \quad (\gamma \neq 0 \text{ の時})\end{aligned}$$

となる .

実空間と双対空間の間における一般的な性質

前述の双対空間の定義から , 実空間と双対空間の間の各図形に関して , 次のような性質が考えられる . なお , ここで図形とは , { 点 , 直線 , 平面 } のことである . これらの性質の証明を付録に記す .

各性質の文中で , “ 一方の空間 ” と “ 他方の空間 ” には , “ 実空間 ” と “ 双対空間 ” が入るが , 実空間と双対空間は双対な関係であるから , 空間の名前を入れ換えてもその性質は成り立つ .

性質

1. [点と平面 \leftrightarrow 平面と点 の関係]

一方の空間である点を含む平面は , 他方の空間ではその点に双対な平面に含まれる点となる (図 3.8) .

2. [点と直線 \leftrightarrow 平面と直線 の関係]

一方の空間である点を通る直線は , 他方の空間ではその点に双対な平面に含まれる直線となる (図 3.9) .

3. [平面と点群 \leftrightarrow 点と平面群 の関係]

一方の空間である平面内に存在する点群は , 他方の空間ではその平面に双対な点を共有する平面群となる (図 3.10) .

4. [点と直線群 \leftrightarrow 平面と直線群 の関係]

一方の空間である点を通る直線群は , 他方の空間ではその点に双対な平面に含まれる直線群となる (図 3.11) .

5. [直線と点群 ↔ 直線と平面群 の関係]

一方の空間である直線上に並ぶ点群は，他方の空間ではその直線に双対な直線で交わる平面群となる (図 3.12) .

上記の性質から，実空間中に存在する図形の双対空間中での挙動が分かり，その応用例として以下のようなものが挙げられる .

応用例

- a. 実空間中で，ある点からある点群へ引いた直線群は，その点群が一直線上に並んでいるならば，双対空間中では，その点に双対な平面内で，ある点で交わる直線群となる . これは，実空間中で，ある直線上の点に引いた直線群は，平面をなすからであり，双対空間中で直線群が交わっている点はこの平面に双対な点である (図 3.13) .
- b. 実空間中で，ある 1 点を通る 2 直線と，その 2 直線から構成される平面は，双対空間中では，点に双対な平面に含まれ，平面に双対な点で交わる 2 直線となる (図 3.14) .
- c. 実空間中で，1 点で交わっている直線群から成る平面群は，双対空間中では，点に双対な平面内の直線群による交点群となる (図 3.15) .

以上，双対空間の定義と性質について詳しく述べた . 次節では，この双対空間中で重心平面がどのように構成されているかを述べる .

3.4.3 双対空間中での物体の移動軌跡

式 (3.7) で示した 3 次元情報を含んだ重心平面は，双対空間ではその定義により，点 $(\alpha', \beta', \gamma')$ と射影される . 実空間中で物体重心が移動することによって構成される重心平面群，言い替えるならば移動軌跡ということになるが，これは双対空間の性質 5 により，双対空間中では実空間中での 2 つの視点を結んだ基線に双対な直線上にのることになる (図 3.16) . 同様にして，実空間中での基準平面もまた双対空間では点となり，上で述べた直線上にのることになる . 従って，双対空間中で重心平面と基準平面との比較を行うには，これらの平面に双対な点の距離を使うのが適当である .

ここで，双対空間中での点 $P_1(p1_x, p1_y, p1_z)$ と点 $P_2(p2_x, p2_y, p2_z)$ との距離 d は，

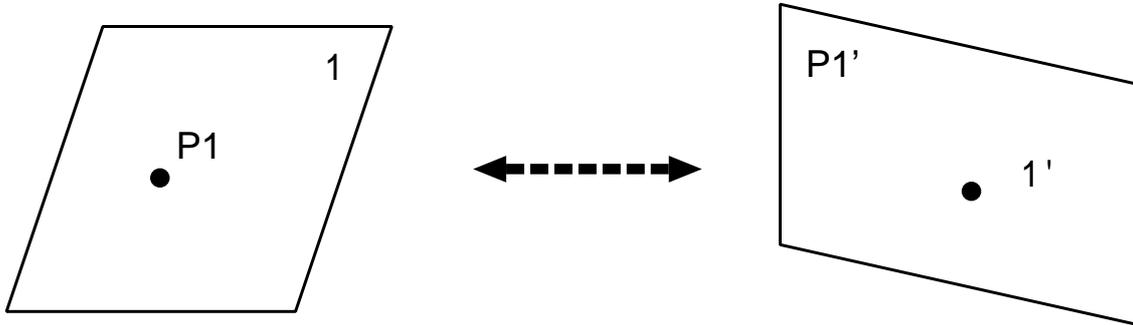


圖 3.8: 性質 1

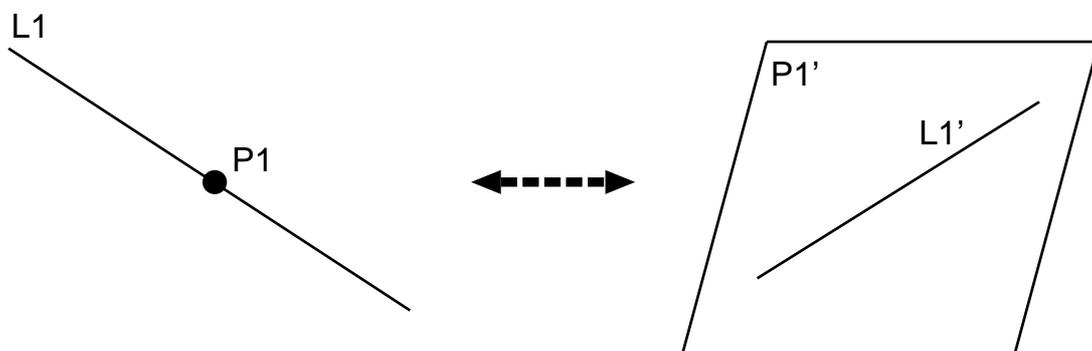


圖 3.9: 性質 2

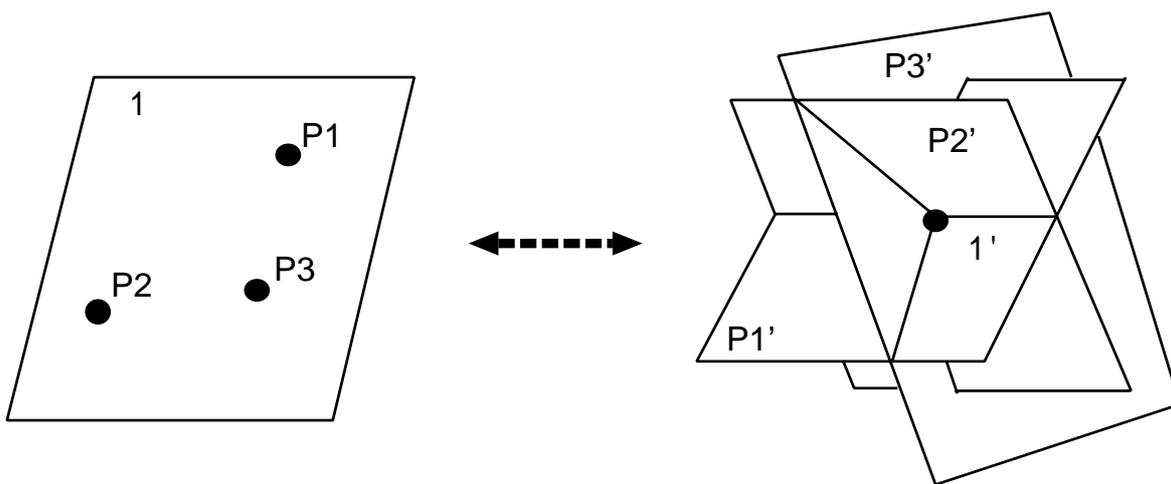


圖 3.10: 性質 3

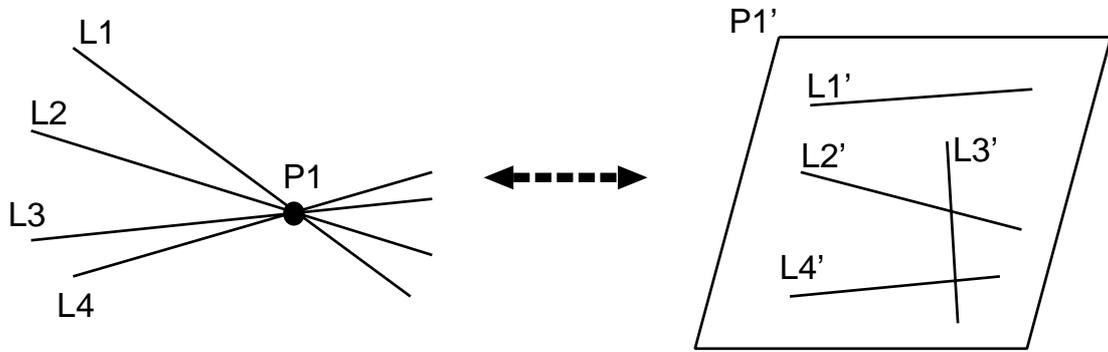


圖 3.11: 性質 4

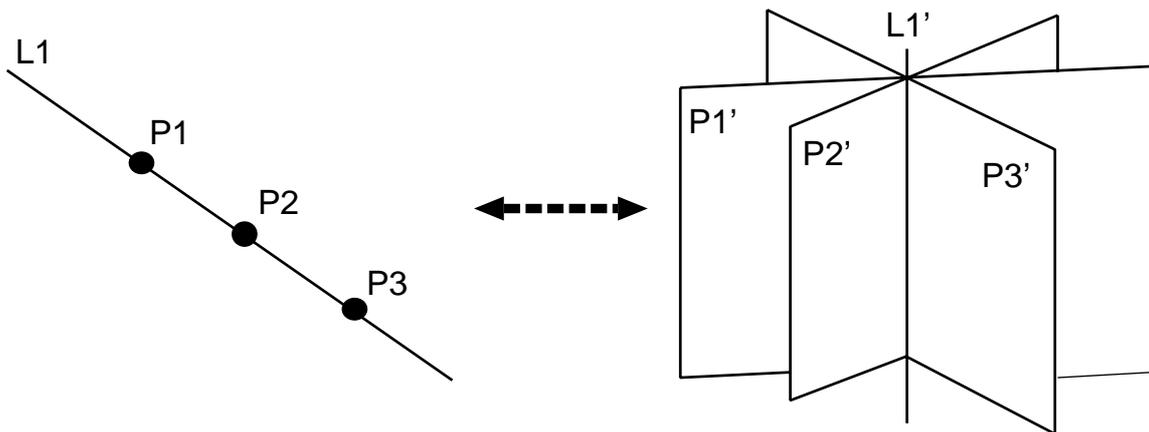


圖 3.12: 性質 5

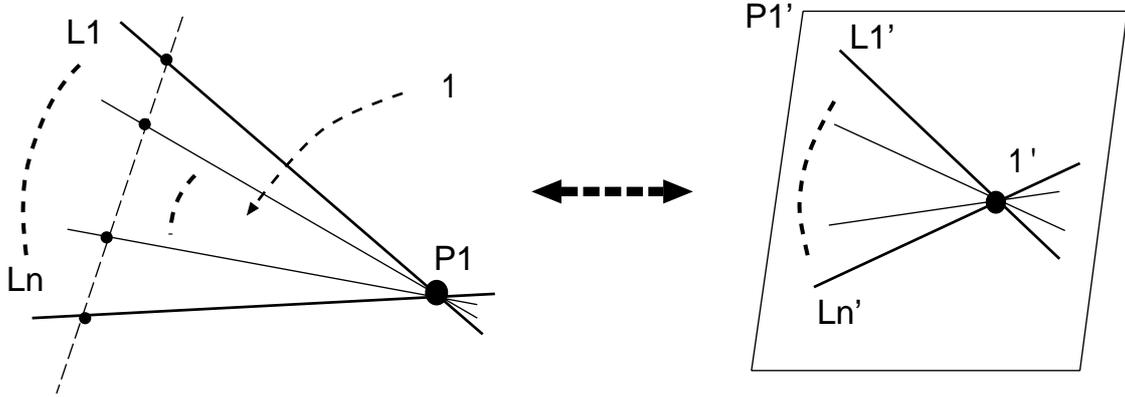


图 3.13: 应用例 a

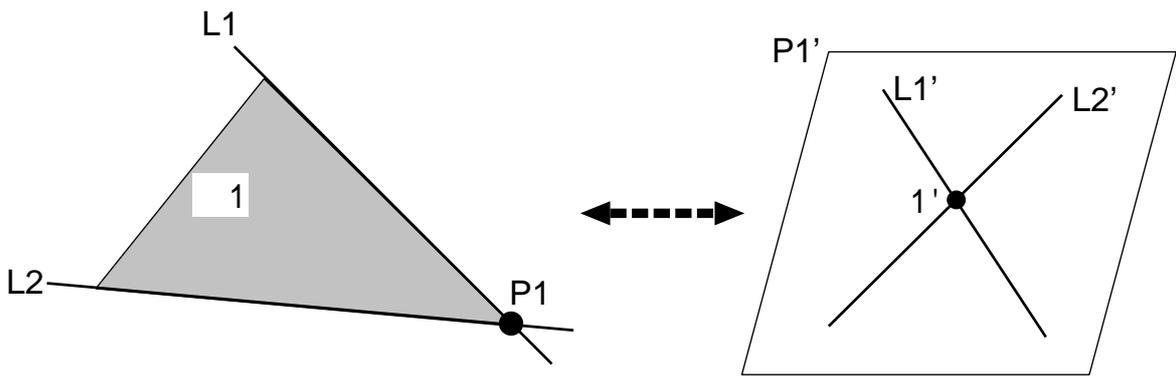


图 3.14: 应用例 b

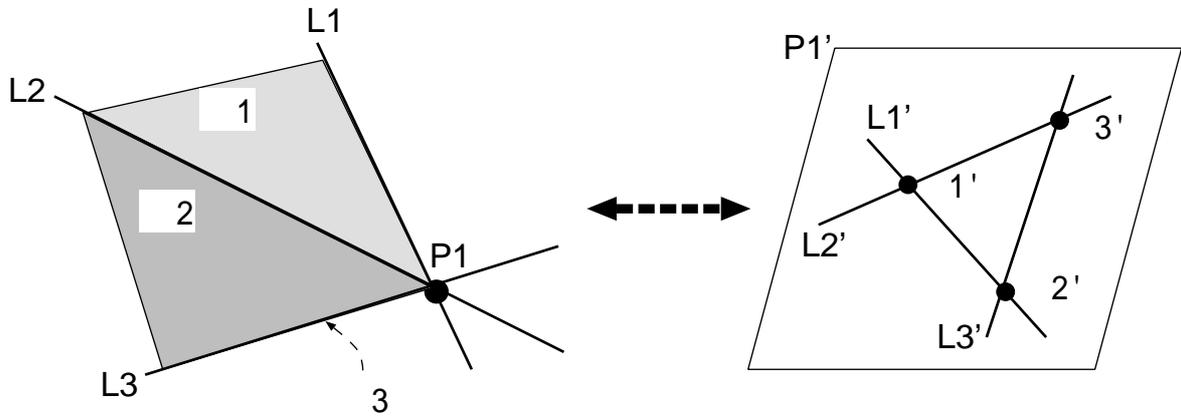


図 3.15: 応用例 c

$$\begin{aligned}
 d^2 &= (p2_x - p1_x)^2 + (p2_y - p1_y)^2 + (p2_z + p1_z)^2 \\
 &= p1_x^2 + p1_y^2 + p1_z^2 + p2_x^2 + p2_y^2 + p2_z^2 - 2(p1_x p2_x + p1_y p2_y + p1_z p2_z) \\
 &= |\vec{P}_1|^2 + |\vec{P}_2|^2 - 2\vec{P}_1 \cdot \vec{P}_2 \\
 &= (\vec{P}_1 - \vec{P}_2)^2 \\
 d &= |\vec{P}_1 - \vec{P}_2|
 \end{aligned}$$

となり，これら P_1, P_2 に双対な実空間中での平面 $p1_x X + p1_y Y + p1_z Z + 1 = 0$ と $p2_x X + p2_y Y + p2_z Z + 1 = 0$ の法線ベクトルの差のスカラということになる．また，この式は式 (3.8) で示した 3 次元情報を考慮した物体の移動軌跡に用いる特徴量と一致する．このことによって，実空間中では原点との距離を考慮した平面の法線ベクトルの差の大きさだったものが，双対空間中では点と点との距離となり，問題の見通しがよくなる．計算量を考えると物体の移動軌跡を実空間で扱うのと双対空間で扱うのではそれほど差はない．

3.5 まとめ

本章では，本研究で提案する多視点動画像間での移動物体の対応づけ手法について説明を行った．本章で提案した手法は，環境に制限がなく，また対象物体は剛体・非剛体を問わないとし，従来の研究で問題となっている各視点間で適合性の乏しい見かけの特徴量は

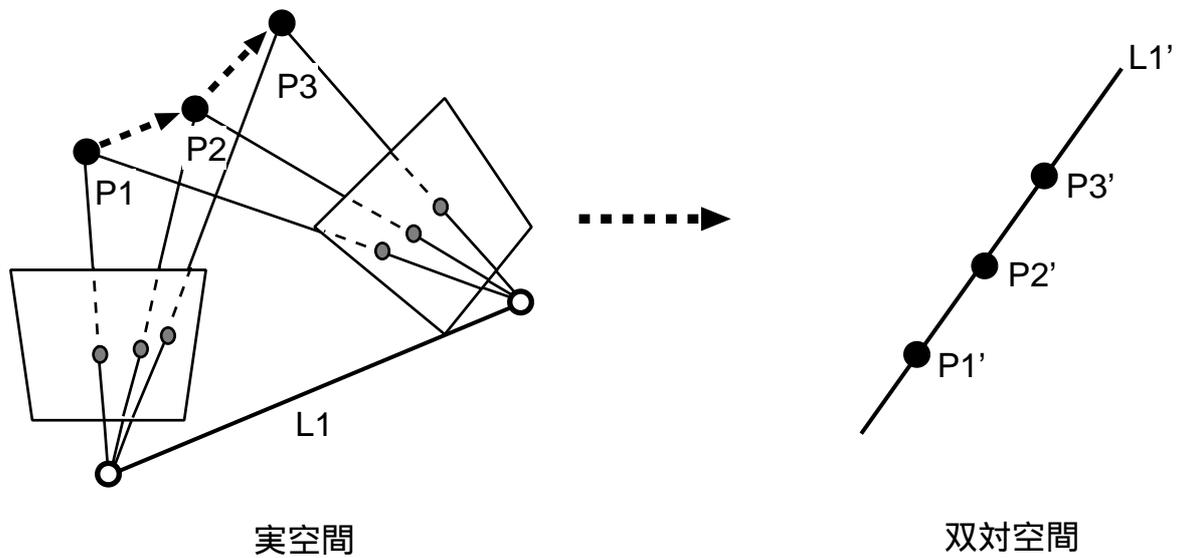


図 3.16: 双対空間への物体の移動軌跡の射影

使用しないといった考えに基づき，構成されている．そのために，多視点動画像間での物体の対応づけの特徴量として，見かけの類似度が比較的大きな物体の重心位置を選んだ．また，対応づけに際して，従来手法のようにある特定の時間における画像だけを用いて対応づけを行うのではなく，物体の動き全体，つまり移動軌跡を見て対応づけを行う手法にした．このような考えに基づき，対応づけの手法を構築することにより，人物などの非剛体を対象とした対応づけにおいても，厳密なモデルをもちいることなく，対応づけが可能となる．

次章では，実際に実画像に本手法を適応し，得られた結果について考察を行う．

第 4 章

実験

前章までの議論をもとに，本章では本研究で提案する手法を計算機上にインプリメントし，提案手法が妥当なものであるかどうかを検証するために行った実験の結果を示し，考察を行う．

4.1 前提条件

実験を行うに当たって，以下の仮定を用いた．

- カメラパラメータは既知であるとする．
- 各カメラから得られた画像中の物体はあらかじめ検出されており，各動画像間での物体の追跡は行えてるものとする．

4.2 実験環境

多視点動画像では，各カメラから得られた時系列画像間での時間的同期がとれてなければならぬ．2 台のカメラから入力された画像の同期をとる装置にクリスタル・アイズ・レコード・コントローラがある．これは，2 つの入力から得られる画像をそれぞれ横方向に 1/2 圧縮し，それらを横に並べ，1 枚の画像として記録する装置である．本実験では，この装置に SONY 製の CCD カメラ CCD-VX1 を 2 台繋げ，撮影を行った (図 4.1)．このようにして得た同期のとれた実画像を入力画像の例として図 4.2 に挙げておく．

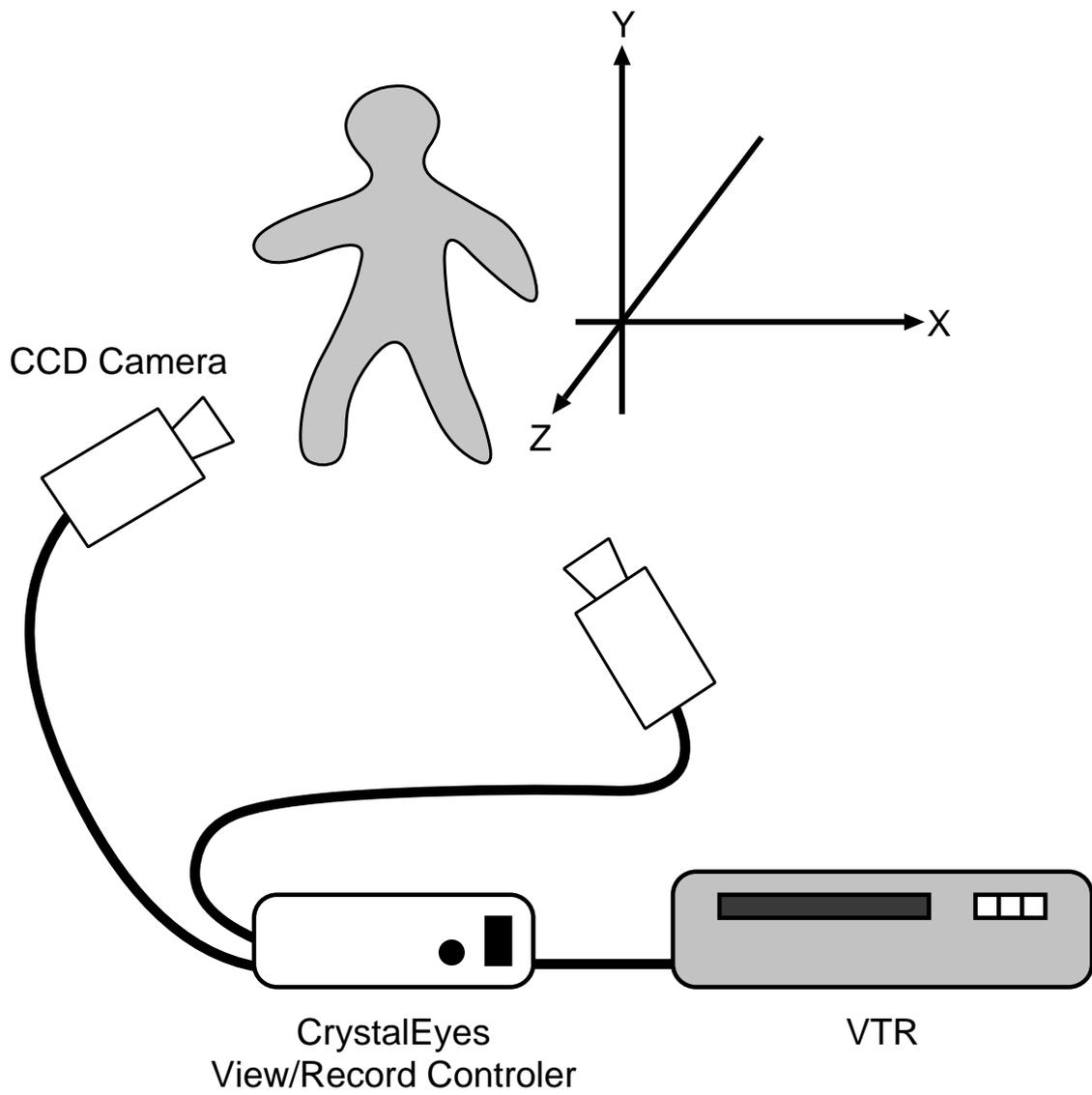
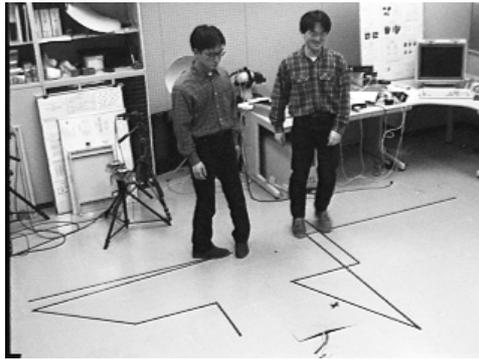
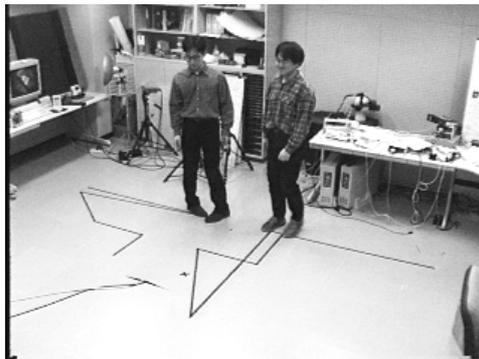


図 4.1: 実画像撮影システム



(a) カメラ 1



(b) カメラ 2

図 4.2: 同期のとれた入力画像

4.3 カメラパラメータの導出

本研究では，カメラ位置はあらかじめ既知としてある．そのため 3 次元空間中に配置したカメラのワールド座標や光軸の向き，焦点距離といったパラメータを導出しなければならない．本研究で扱う多視点動画はステレオ視の拡張と捉えることができる．そこで，カメラパラメータはステレオ視の場合において利用されるカメラキャリブレーションを用いて求める．その前に，まず使用するカメラモデルを決めておく．

4.3.1 カメラの内部モデル

カメラ構造はピンホールカメラで近似し，以下の仮定をおいた (図 4.3) ．

- ピンホールは三次元空間を記述する座標上原点に位置する．
- 光軸は Z 軸と一致する．画像面は $X - Y$ 平面に平行．

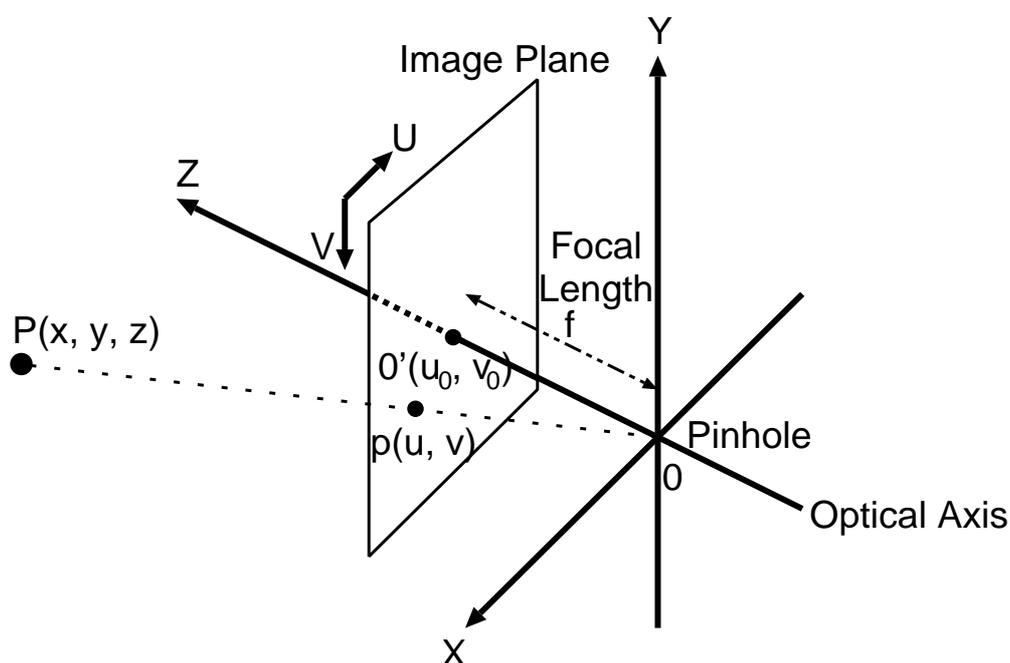


図 4.3: カメラ内部モデル

三次元空間上の点 $P = (x, y, z)$ が，画像面上の点 $p = (u, v)$ に投影されるとすると，

$$\frac{u - u_0}{f} = -\frac{x}{z}, \quad \frac{v - v_0}{f} = -\frac{y}{z}$$

$$u = -\frac{f}{z}x + u_0 \quad (4.1)$$

$$v = -\frac{f}{z}y + v_0 \quad (4.2)$$

となる．ここで， f はピンホールから画像面までの距離（焦点距離）， $0'$ は光軸と画像面の交点（主点，principal point）である．

4.3.2 カメラの外部モデル

カメラの外部モデルを図 4.4に示す．カメラの位置・姿勢は以下の 6 自由度を持つ．

- カメラの位置 (x_0, y_0, z_0)
- x, y, z 軸に関する回転 (α, β, γ)

カメラの姿勢を考慮する場合，式 (4.1), (4.2) のモデルを適用するためには，点 $P' = (x', y', z')$ を式 (4.1), (4.2) の座標系上の点 $P = (x, y, z)$ に変換する必要がある．そのために，カメラ位置をワールド座標系の原点に平行移動し，光軸を Z 軸に一致させるように回転を行う．回転行列を R ，オフセット行列を T とすると

$$P = RP' - T \quad (4.3)$$

となる． R は式 (4.4)， T は式 (4.5) で表される．

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4) \end{aligned}$$

$$T = [x'_0 \ y'_0 \ z'_0]^T \quad (4.5)$$

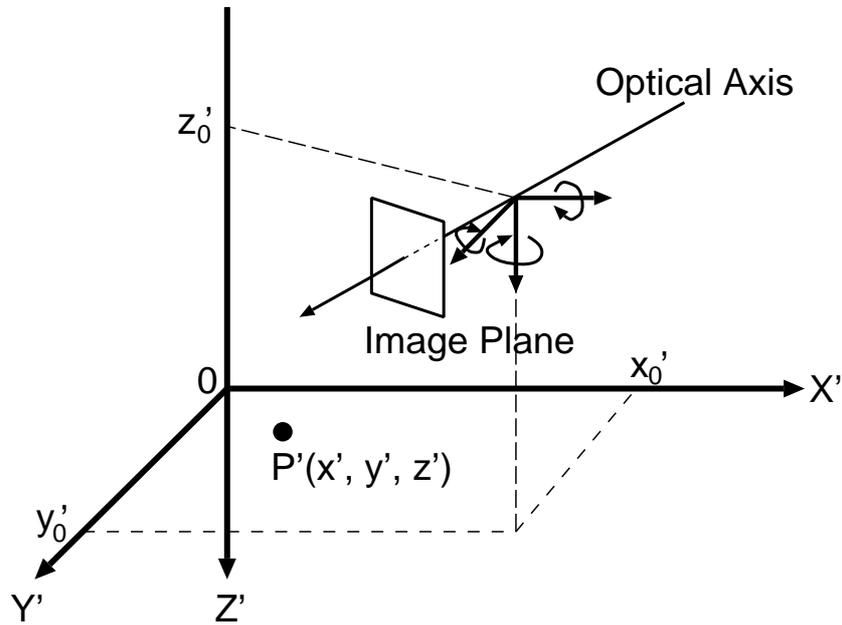


図 4.4: カメラ外部モデル

この内部モデルと外部モデルを組み合わせることで、任意の姿勢をとるカメラのカメラモデルを表現できる。式 (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) よりカメラモデルは式 (4.6), (4.7) になる。

$$u = -\frac{r_{11}x' + r_{12}y' + r_{13}z' - x'_0}{r_{31}x' + r_{32}y' + r_{33}z' - z'_0}f + u_0 \quad (4.6)$$

$$v = -\frac{r_{21}x' + r_{22}y' + r_{23}z' - y'_0}{r_{31}x' + r_{32}y' + r_{33}z' - z'_0}f + v_0 \quad (4.7)$$

4.3.3 キャリブレーション

カメラパラメータを得るためには、前節で導き出したカメラモデル中のパラメータを求める必要がある。この作業のことをキャリブレーションと呼ぶ。

式 (4.6), (4.7) を整理すると、

$$u = \frac{c_{11}x' + c_{12}y' + c_{13}z' + c_{14}}{c_{31}x' + c_{32}y' + c_{33}z' + c_{34}} \quad (4.8)$$

$$v = \frac{c_{21}x' + c_{22}y' + c_{23}z' + c_{23}}{c_{31}x' + c_{32}y' + c_{33}z' + c_{34}} \quad (4.9)$$

ここで

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \end{bmatrix} &= -f \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & -x'_0 \end{bmatrix} + u_0 \begin{bmatrix} r_{31} & r_{32} & r_{33} & -z'_0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix} &= -f \begin{bmatrix} r_{21} & r_{22} & r_{23} & -x'_0 \end{bmatrix} + v_0 \begin{bmatrix} r_{31} & r_{32} & r_{33} & -z'_0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_{31} & r_{32} & r_{33} & -z'_0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

である。 c_{34} で他のパラメータ ($c_{11} \sim c_{33}$) を正規化すると、3次元空間上の点 $P'(x', y', z')$ から画像面上の点 $p(u, v)$ を求めるために必要なパラメータは 11 個となる。

11 個のパラメータを決定するためには、点 P', p の観測値の組が最低 6 組必要となる。実際は、多数の組を観測し最小 2 乗法によりパラメータを決定する。

3次元空間上の i 番目の点 (x_i, y_i, z_i) が画像上のピクセル座標 (u_i, v_i) 上に投影されたとする。このときの u, v 方向の誤差を各々 E_{u_i}, E_{v_i} で表す。 n 個の点の観測を行い、誤差の 2 乗和

$$err = \sum_{i=1}^n (E_{u_i}^2 + E_{v_i}^2) \quad (4.10)$$

を最小にするパラメータを求める。

上記の計算により得られた、本実験におけるカメラパラメータを以下に示す。

表 4.1: 本実験におけるカメラパラメータ

	カメラ 1	カメラ 2
位置 (cm)	(-357, 260, 212)	(-357, 252, 208)
光軸の方向ベクトル	(0.852, -0.384, 0.357)	(0.837, 0.386, 0.387)
焦点距離 (pixel)	500	500

4.4 シーンの詳細

ここでは本実験のシーンの詳細について述べる。実験で用いる画像は時間的同期がとれてなければならない。時間的な同期をとる装置を 4.2 節で紹介したが、この装置を持ち運び、撮影を行い、さらにカメラどうしの距離が非常に大きな場合において、キャリブレーションを行うのは困難である。従って、実験は撮影可能な実験室内で行った。移動物体は

身長 173cm と 171cm の人物 2 人とし，復元された 3 次元的な移動軌跡と比較を行うため，あらかじめつけておいた床上の印に従って移動してもらった．カメラの配置と物体の移動軌跡を図 4.5 に示す．

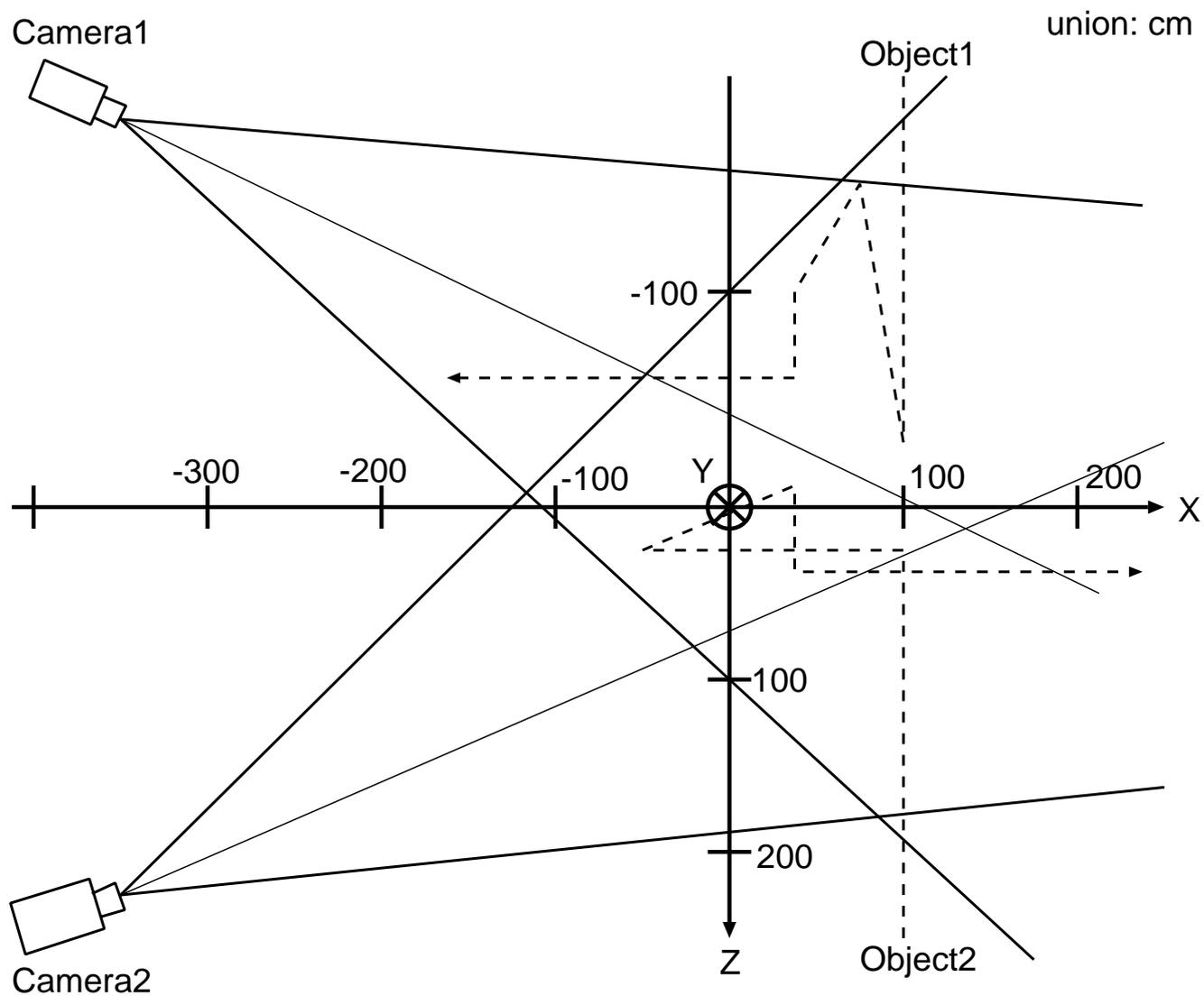


図 4.5: カメラの配置と物体の移動軌跡

4.5 前処理

本実験で用いた実画像は 30frame/sec で撮影したものであり、これらの画像を計算機に 24bit カラー画像 (ppm 形式)、画像サイズは 320x240(pixel) として取り込んだ。そのうち実験に用いた画像枚数は 314 枚 (約 10.5 秒) である。

本実験では、前提条件として、画像中の移動物体は抽出でき、追跡は行えてるものとしていた。従って、画像中の物体の抽出、追跡に関しては本研究では深い考察は行わない。ここでは、本実験において、使用した移動物体の抽出処理についてだけ簡単に説明する。

移動物体の抽出

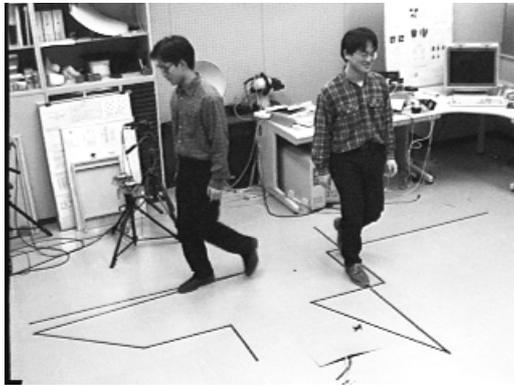
本研究では、対象とする環境、及び物体にはなんら制限を与えていない。そのため、画像からの移動物体の抽出は環境変動に強い手法を用いるべきである。

そのような物体抽出法として、正規化相互相関法がある。この手法は入力画像 I と背景画像 I' から $n \times n$ のテンプレートを切りだし、テンプレート内の相関を調べ、その類似度により探索している画素が移動物体であるか背景であるかを判断する。この手法はテンプレートのサイズが大きいほど、移動物体を背景と間違えることは少なくなり、照明の微妙な変化といった環境の変動に対してロバストになる。また、テンプレート内の画素の輝度値が全体的にある一定の値で変化するような部分は相関が高くなり、移動物体として検出されない。これにより、影の部分を除去することができる。反面、2.2 節で述べたようにテンプレートマッチングを用いているということで計算時間がかかり、雑音に弱くなるという性質を持っている。従って、よりロバストな物体抽出を行うには、この手法を適用した画像に対し、単純な差分処理や膨張・圧縮処理を加えた手法を用いるのがよい。

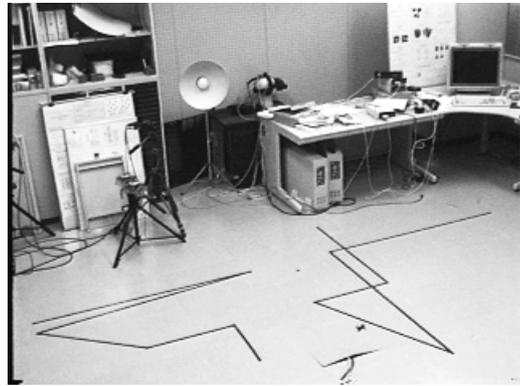
相関値は以下の式によって求められる。 i, j は画像面中の座標値である。

$$C_{i,j} = \frac{\vec{I}_{i,j} \cdot \vec{I}'_{i,j}}{|\vec{I}_{i,j}| |\vec{I}'_{i,j}|} \quad (4.11)$$

正規化相互相関法を用いた画像の差分結果を図 4.6 に示す。



(a) 入力画像



(b) 背景画像



(c) 差分画像

図 4.6: 正規化相互相関法を用いた移動物体の抽出

4.6 実験結果

4.6.1 差分画像中の移動物体の重心の算出

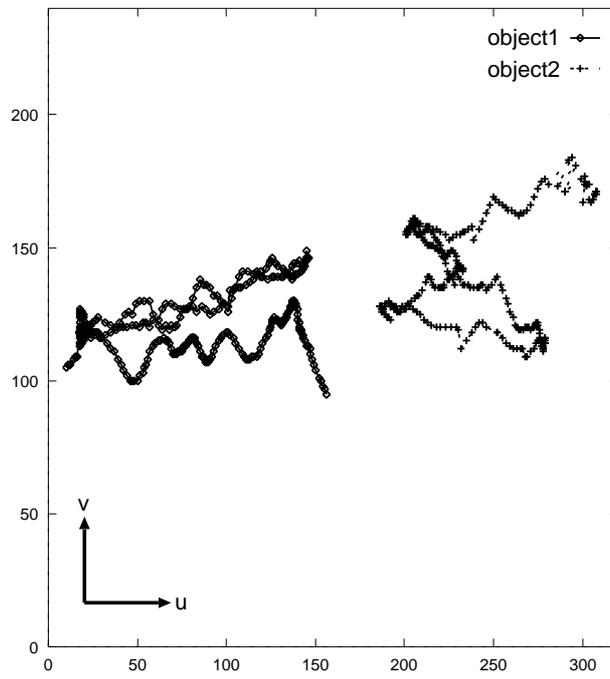
まず始めに，前節で述べた手法を用いて得られた差分画像から，対応づけの特徴量となる物体の重心を求める．

得られた差分画像を端から順に探索し，8近傍連結成分にラベルづけを行い，画像中の物体を抽出した．画像には若干ながら雑音や照明の変化により誤って検出された背景が存在するので，物体を構成している画素数がある閾値以下の場合には，物体ではないと判断し，取り除いた．

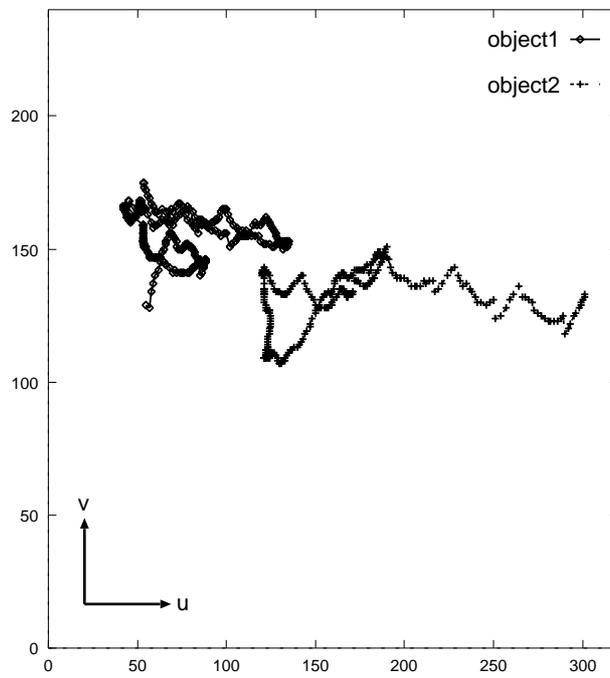
求められた移動物体の重心の画像中での動きを図 4.7 に示す．これを見ると，重心位置は人物の歩調に合わせて上下に振幅しているのがわかる．

4.6.2 重心平面を用いた移動物体の対応づけ

前節で得られた物体の重心でできる重心平面を 3.4.2 節で説明した双対空間を用いた特徴量に変換した結果を図 4.8 に示す．横軸は時間軸，縦軸は実空間中での基準面を双対に射影した点と重心平面を双対空間に射影した点の距離を表している．歩行する人物の重心から平面を構成したので，全体を通してかなりばらつきがある．得られた結果を式 (3.3) に当てはめ，得られた値をグラフにしたものを図 4.9 に示す．どのグラフもカメラ 1 から撮影された画像中の 1 つの物体の見た目の軌跡と，カメラ 2 から撮影された画像中のそれぞれの物体の見た目の軌跡の差をとったものである．横軸に時間，縦軸に式 (3.3) から得られた値をとっている．図 4.9(a), 4.9(b) はその時間みの値を式 (3.3) に代入して得られた結果である．これらのグラフを見るとわかるように，瞬間的な時間だけのデータを用いて対応づけを行うのはほぼ不可能である．図 4.9(c), 4.9(d) は式 (3.3) から得られる値そのものを時間方向に累積していったグラフである．物体の運動は最初の部分 (約 130 フレーム) と最後の部分でエピソード平面上にのるように動いたため，その区間ではグラフは水平となり，対応づけが困難な結果となっている．しかし，全体を通してみると，物体の対応は明らかにつくことがわかる．これらの結果から，各画像間での物体の対応づけを行うには，ある短い時間内で得られた結果を用いるのではなく，時間全体にわたる物体の移動軌跡を用いることが妥当であることがわかる．



(a) カメラ 1



(b) カメラ 2

図 4.7: 画像中での物体の重心の軌跡

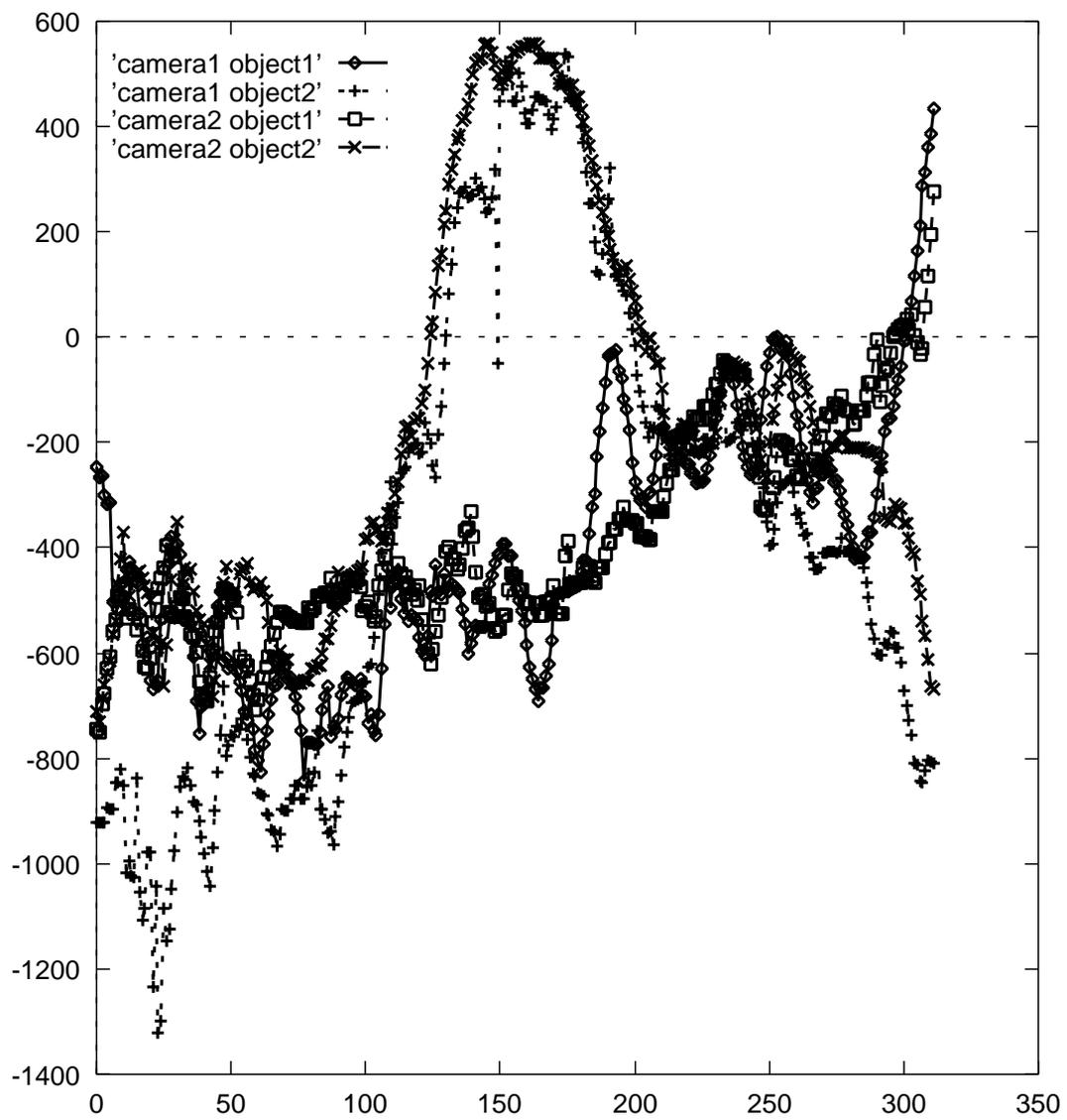
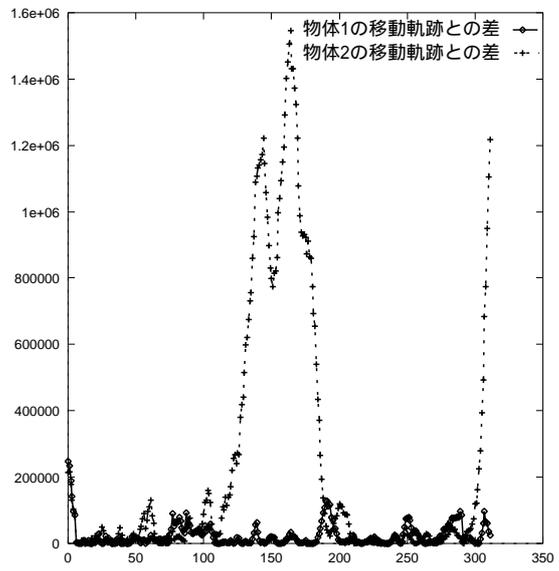
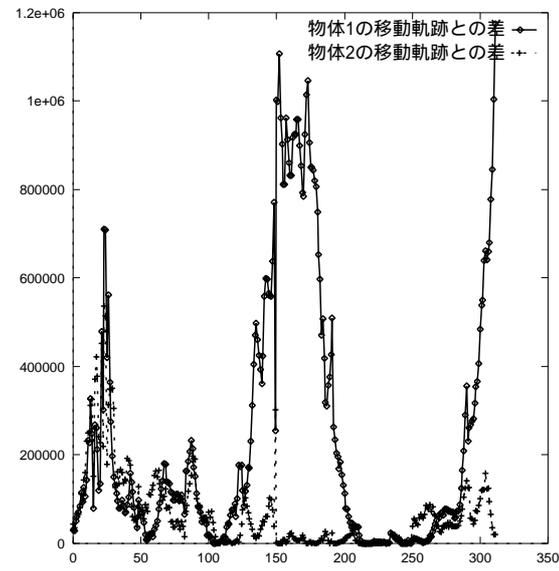


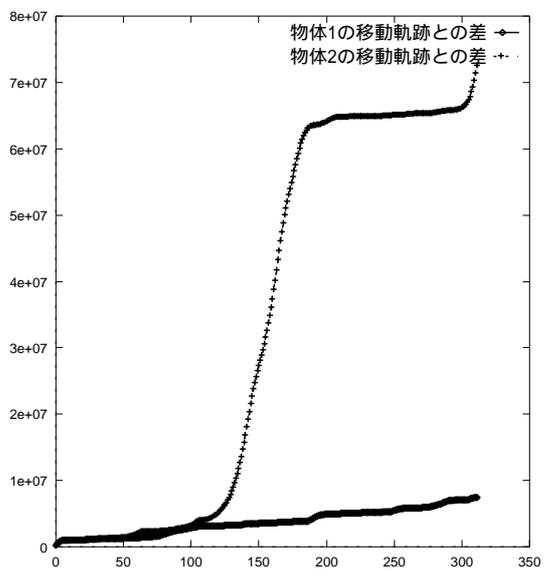
図 4.8: 移動物体の軌跡



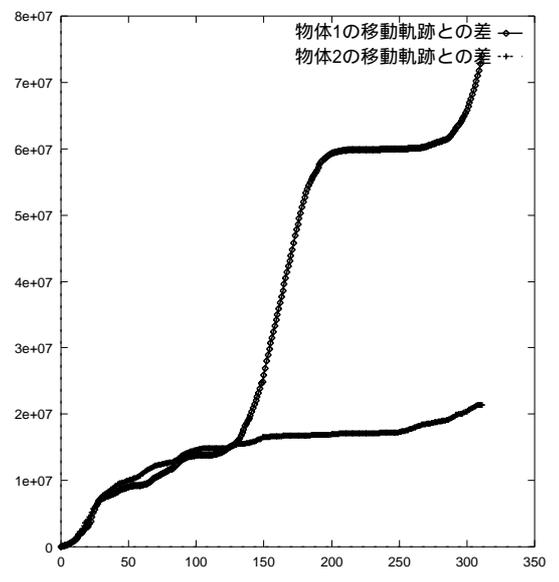
(a) ある時間における物体 1 の軌跡との誤差



(b) ある時間における物体 2 の軌跡との誤差



(c) 物体 1 の軌跡との累積誤差



(d) 物体 2 の軌跡との累積誤差

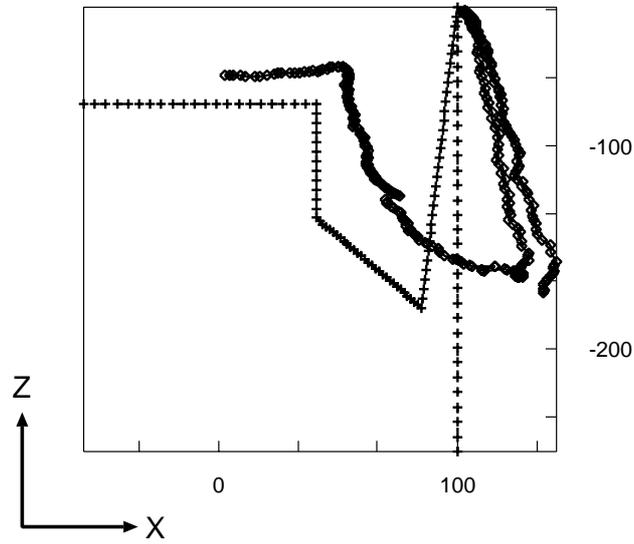
図 4.9: 物体の移動軌跡の誤差

4.6.3 物体の移動軌跡の復元結果

本研究では，物体の正確な移動軌跡の復元を目的とはしていない．しかし，物体重心のみを用いた物体の3次元位置の復元が，実画像を用いた場合において，どの程度信頼のけるものであるかを確認する必要がある．各画像間で対応づいた物体の移動軌跡を式(3.6)を使って3次元的に復元したものと実際の移動軌跡を比較したものを図4.10に示す．

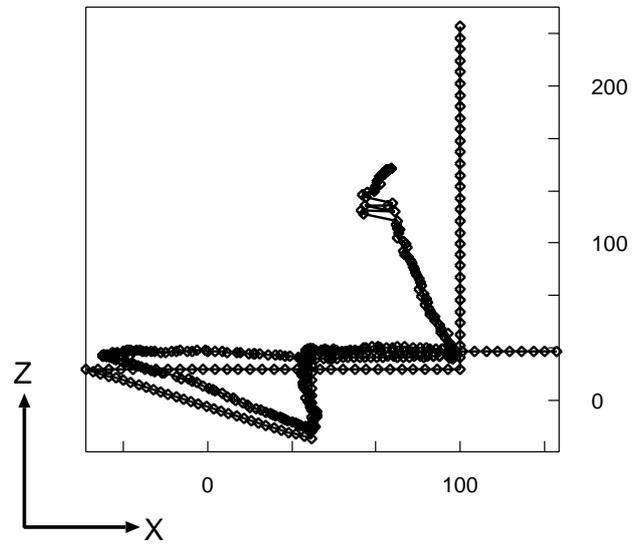
縦にZ軸，横軸にX軸をとり，Y軸は紙面に垂直であり，軸の単位はcmである．表示の関係上，図4.5を下から見たものとなっている．人物は床上につけた印の上を適当に歩いたため，シミュレーションされた移動軌跡とは少し異なる．また，床上の印の計測誤差，カメラパラメータの誤差，背景差分による物体の抽出誤差などを考慮すると，復元された移動軌跡にはかなりの誤差が含まれると推測される．物体1における復元された移動軌跡の誤差は約15cm～20cmあり，物体の正確な移動軌跡が必要となるシステムにおいては，さらに精度のよいカメラパラメータや背景差分手法が必要となる．

復元された物体の軌跡 \diamond
 実際の物体の軌跡 $+$



(a) 物体 1

復元された物体の軌跡 \diamond
 実際の物体の軌跡 \diamond



(b) 物体 2

図 4.10: 復元された物体の 3 次元移動軌跡

第 5 章

結論

計算機の記憶容量・処理速度の向上，画像中の物体の追跡・認識や自律移動ロボットなどの研究の進歩により，近年になって，多視点画像を用いた物体追跡・認識を行う研究がなされるようになった．

多視点画像を用いた従来の研究は，ほとんどのものが従来のステレオ視の手法をそのまま利用する，または応用するといったものであり，対象となる物体に様々な制約が必要となる．その原因としては，カメラの光軸のなす角度である輻輳角の大きさにある．ステレオ視の場合，輻輳角はそれほど大きくはなく，それぞれのカメラから得られた画像中の物体の大きさ，位置，形，濃淡といった見ための特徴量は比較的適合性が高い．そのため，それらの値を用いて画像間での特徴点の対応づけを行うのが一般的となっている．

一方，多視点画像の場合，各カメラから撮影された画像中の対象物体の見かけの類似度は，その輻輳角の大きさから，曖昧性を増してくる．そのため，対象となる環境や物体に対して様々な制約が必要となる．

本研究では，多視点画像間での物体の対応づけを単なるステレオ視の拡張ではなく，それぞれの視点から得られる時系列画像での対応づけとして捉えた．また，物体の対応づけに用いる特徴量として，各視点から観測される物体の見ための特徴量として比較的安定している物体の重心位置のみを用いた．このように対応づけが曖昧となる特徴量を使用しないことで，対象となる物体への制限を取り除いた．また，物体の見ための重心とそれぞれのカメラのレンズ中心を含む平面を構成することにより，2 視点間で共通する物体の対応づけに利用できる特徴量を提案した．さらにその特徴量を用いることにより求められる物体の移動軌跡を用いて物体の対応づけを行う手法を提案した．

最後に、本手法を実際に実画像に対して適用し、実画像に対してどの程度有効であるかを確認した。この際、対応づけの対象としたものは人物であり、対応づけの特徴量である物体重心は全体を通してかなりばらついたが、物体の移動軌跡を用いることでそのような場合においても対応づけが容易となることを示した。

今後の課題としては、3眼視以上の状況において、対応づけを効率良く行う手法の開発が挙げられる。また、オクルージョンや重なりが起こった場合の対処法について検討する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり，日頃から全般に渡り熱心な御指導，御鞭撻を頂きました阿部 亨助教授に深く感謝致します．

本研究に関して，多くの御討論，御助言を頂きました堀口 進教授に心から感謝致します．

サブテーマにおいて，熱心に御指導を頂きました國藤 進教授に深く感謝致します．

本研究を勧める上で，熱心な御指導を頂きました沼田 一成元助手に心から感謝致します．

最後にゼミは多くの御討論をして頂き，また日常においてもいろいろとお世話になりました堀口・阿部研究室の皆様には感謝致します．

参考文献

- [1] E.H.Durfee, V.R.Lesser, and D.D.Corkill : “ Coherent Cooperation among Communicating Problem Solvers ”, *IEEE Trans. on Computers*, Vol.C-36, No.11, pp.1275-1291 (1987).
- [2] 西尾秀一 , 大田友一 : “ 複数画像センサの統合による交差点車両追跡 ”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'92), pp.I-169-I-176 (1992).
- [3] S.Nishino, and Y.Ohta : “ Tracking of Vehicles at an Intersection by Integration of Multiple Image Sensors ”, *Proc.IAPR Workshop on Machine Vision Applications*, pp.321-324 (1992).
- [4] 和田俊和, 田村牧也, 松山隆司 : “ 広域分散監視システムにおける分散協調型対象同定法 ”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'96), pp.I-103-I-108 (1996).
- [5] 江尻正員 , 大田友一 , 池内克史 : “ マシンビジョン ”, これからの画像情報シリーズ 4, 昭晃堂.
- [6] D.I.Barnea, and H.F.Silverman : “ A Class of Algorithms for Fast Digital Image Registration ”, *IEEE Trans. on Computers*, Vol.C-21, No.12, pp.179-186 (1972).
- [7] 尾上守夫 , 前田紀彦 , 斉藤 優 : “ 残差逐次検定法による画像の重ね合わせ ”, 情報処理, Vol.17, No.7, pp.634-640 (1976).
- [8] 山本正信 : “ 連続ステレオ画像からの 3 次元情報の抽出 ”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J69-D, No.11, pp.1631-1638 (1986).

- [9] C.Tomasi, and T.Kanade : “ Shape and Motion from Image Stream under Orthography: a Factorization ”, *International Journal of Computer Vision*, Vol.9, No.2, pp.137–154 (1992).
- [10] 金出武雄 , コンラッド・ポールマン , 森田俊彦 : “ 因子分解法による物体形状とカメラ運動の復元 ”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J76–D–II, No.8, pp.1497–1505 (1993).
- [11] 笹野 剛 , 出口光一郎 : “ 因子分解法による画像時系列からの形状復元法の検討 ”, 情報処理学会コンピュータビジョン研資, 87–3 (1994).
- [12] J.Codteria, and T.Kanade : “ A Multi-body Factorization Method for Motion Analysis ”, *Proc. IEEE Fifth International Conference on Computer Vision*, Boston, MA, pp.1071–1076 (1995).
- [13] 山口富士夫: “ コンピュータディスプレイによる図形処理工学 ”, 日刊工業新聞社 (1981).
- [14] 山口富士夫: “ コンピュータディスプレイによる形状処理工学 [III] ”, 日刊工業新聞社 (1988).

研究業績

- [1] 広域シーンの状況認識における運動物体対応づけに関する一手法
田縁英治，阿部 亨，堀口 進
電気関係学会北陸支部連合大会, F-53, pp.368 (1996).

付録 A

実空間と双対空間における性質の証明

ここでは、3.4.2節で示した性質について、その証明を行う。以下、実空間から双対空間という形で証明を行うが、その逆についても同様にして証明される。なお、実空間中の座標系を XYZ 、双対空間中の座標系を UVW とする。

性質 1

一方の空間である点を通る平面は、他方の空間ではその点に双対な平面に含まれる点となる。

[証明]

実空間中に存在する平面 α を

$$aX + bY + cZ + d = 0 \quad (d \neq 0)$$

とし、平面 α に含まれる点 P を

$$(x, y, z)$$

とおくと、

$$ax + by + cz + d = 0 \tag{A.1}$$

が成り立つ。

次に平面 α 、点 P を双対空間へ射影すると、平面 α は点 α'

$$\left(\frac{a}{d}, \frac{b}{d}, \frac{c}{d} \right) \tag{A.2}$$

点 P は平面 P'

$$xU + yV + zW + 1 = 0 \quad (\text{A.3})$$

となる．ここで，式 (A.3) の両辺に d をかけると，

$$dxU + dyV + dzW + d = 0 \quad (\text{A.4})$$

となる．式 (A.4) に式 (A.2) を代入すると，

$$\begin{aligned} \text{式 (A.4) の左辺} &= dx \frac{a}{d} + dy \frac{b}{d} + dz \frac{c}{d} + d \\ &= ax + by + cz + d \\ &= 0 \quad (\text{式 (A.1) より}) \end{aligned}$$

となり，成り立つ．よって，点 α' は平面 P' に含まれる．

従って，性質 1 は成り立つ． \square

性質 2

一方の空間である点を通る直線は，他方の空間ではその点に双対な平面に含まれる直線となる．

[証明]

実空間中に存在する直線 L を

$$\frac{X - x_0}{a} = \frac{Y - y_0}{b} = \frac{Z - z_0}{c}$$

とし，直線 L 上に存在する点 P を

$$(x_1, y_1, z_1)$$

とすると，

$$\frac{x_1 - x_0}{a} = \frac{y_1 - y_0}{b} = \frac{z_1 - z_0}{c} \quad (\text{A.5})$$

が成り立つ．式 (A.5) = t ($t \neq 0$) とおき，媒介変数表示すると，

$$\begin{aligned} x_1 &= at + x_0 \\ y_1 &= bt + y_0 \\ z_1 &= ct + z_0 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

となる .

次に直線 L , 点 P を双対空間へ射影する . 直線 L は直線 L'

$$\frac{U}{\alpha} = \frac{V - c/\alpha}{\beta} = \frac{W + b/\alpha}{\gamma} \quad (\text{A.7})$$

となる . ここで ,

$$\alpha = bz_0 - cy_0$$

$$\beta = cx_0 - az_0$$

$$\gamma = ay_0 - bx_0$$

であり , $\alpha \neq 0$ とする . さらに式 (A.7) = s とおき , 媒介変数表示すると ,

$$\begin{aligned} U &= \alpha s \\ V &= \beta s + a/\alpha \\ W &= \gamma s - b/\alpha \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

となる . 点 P は平面 P'

$$x_1U + y_1V + z_1W + 1 = 0 \quad (\text{A.9})$$

となる . ここで式 (A.9) の両辺に α をかけると ,

$$\alpha x_1U + \alpha y_1V + \alpha z_1W + \alpha = 0 \quad (\text{A.10})$$

となる .

式 (A.8) を式 (A.10) に代入すると ,

$$\text{式 (A.10) の左辺} = \alpha x_1 \alpha s + \alpha y_1 (\alpha s + c/\alpha) + \alpha z_1 (\alpha s - b/\alpha) + \alpha$$

$$\begin{aligned} \text{式 (A.6) を代入} &= \alpha(at + x_0)\alpha s + \alpha(bt + y_0)(\alpha s + c/\alpha) + \alpha(ct + z_0)(\alpha s - b/\alpha) + \alpha \\ &= 0 \end{aligned}$$

となり , 成り立つ . よって , 直線 L' は平面 P' に含まれる .

従って , 性質 2 は成り立つ . \square

性質 3

一方の空間である平面内に存在する点群は , 他方の空間ではその平面に双対な点を共有する平面群となる .

[証明]

実空間中の平面 α を

$$aX + bY + cZ + d = 0 \quad (d \neq 0)$$

とし, 点群 P_i を

$$(x_i, y_i, z_i) \quad (i = 1 \cdots n)$$

とすると, 平面 α と点群 P_i の各点に対して, 性質 1 より, 平面 α に双対な双対空間中の点は, 点 P_i に双対な各平面に含まれる.

従って, 性質 3 は成り立つ. \square

性質 4

一方の空間である点を通る直線群は, 他方の空間ではその点に双対な平面に含まれる直線群となる.

[証明]

実空間中の点 P を

$$(x_1, y_1, z_1)$$

とし, 直線群 L_i を

$$\frac{X - x_{0i}}{a_i} = \frac{Y - y_{0i}}{b_i} = \frac{Z - z_{0i}}{c_i} \quad (i = 1 \cdots n)$$

とすると, 点 P と直線群 L_i の各直線に対して, 性質 2 より, 点 P に双対な双対空間中の平面は, 直線 L_i に双対な各直線を含む.

従って, 性質 4 は成り立つ. \square

性質 5

一方の空間である直線上に並ぶ点群は, 他方の空間ではその直線に双対な直線で交わる平面群となる

[証明]

実空間中の直線 L を

$$\frac{X - x_0}{a} = \frac{Y - y_0}{b} = \frac{Z - z_0}{c}$$

とし、点群 P_i を

$$(x_i, y_i, z_i) \quad (i = 1 \cdots n)$$

とすると、直線 L と点群 P_i の各点に対して、性質 2 より、直線 L に双対な双対空間中の直線は、点 P_i に双対な各平面に含まれる。

従って、性質 5 は成り立つ。 \square