

ISSN 0452-2982
UDC 527.7
527.8
531.719.2

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1395

キネマティック GPS とカメラ画像を用いた
誘導路上での障害物検知に関する研究

加藤 智子, 張 替 正 敏
辻 井 利 昭, 村 田 正 秋

1999年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1 . はじめに	2
2 . 障害物検知システムの概要	3
2 . 1 システム構成	3
2 . 2 障害物検知アルゴリズム	4
3 . 人工視界の作成	5
3 . 1 人工視界作成アルゴリズム	5
3 . 2 キネマティック GPS による航空機の位置・姿勢推定	10
3 . 3 GPS 精密測量による地図データベース	15
3 . 4 人工視界の作成例	15
4 . カメラ画像データの処理	16
4 . 1 カメラ画像データの処理手順	16
4 . 2 カメラ画像処理の例	19
5 . キネマティック GPS とカメラ画像の複合化	19
5 . 1 障害物抽出	21
5 . 2 障害物抽出の例	25
5 . 3 障害物位置推定アルゴリズム	26
6 . 障害物検知アルゴリズムの実証実験とその評価	28
6 . 1 誘導路地図データの作成	28
6 . 2 実験システムの構成	28
6 . 3 実験シナリオと評価方法	30
6 . 4 実験結果と考察	33
7 おわりに	46
7 . 1 成果のまとめ	46
7 . 2 今後の課題	46
参考文献	47
付録 A GPS 概論	48
付録 B Sobel フィルタ	50

キネマティック GPS とカメラ画像を用いた誘導 路上での障害物検知に関する研究

加藤 智子^{*1}, 張 替 正 敏^{*2},
辻 井 利 昭^{*2}, 村 田 正 秋^{*2}

Study of Obstacle Detection by Integrating Kinematic GPS with Camera Images for Taxi Guidance

Tomoko KATO, Masatoshi HARIGAE, Toshiaki TSUJII and Masaaki MURATA

ABSTRACT

Achieving more efficient traffic control and improved flight safety in and around airports are among the most important issues for aeronautical engineering. For this purpose, it is essential to realize the free flight led by an autonomous air traffic control with a collision avoidance function and the highly precise satellite navigation that enables airplanes to make instrumental landings that meet the category III C standard. Focusing on the taxi guidance phase in which an airplane taxis on a taxi-way, this report deals with how to build a navigation system which not only precisely measures the airplane's position but also detects obstacles in its path to avoid collision. This system combines satellite navigation (kinematic GPS) with camera images. The idea is to detect obstacles by calculating the difference between the information produced by the synthetic vision of the kinematic GPS and that produced by the camera images. This is the first study to propose this type of method for detecting obstacles. Carrying the system, an airplane will be capable of the autonomous traffic control and management in the taxi guidance, detecting obstacles in its way and measuring their position (both in terms of distance and direction) relative to itself.

To evaluate the actual performance of this method of detecting obstacles on a taxi-way, we constructed a kinematic GPS/camera experimental system for an automobile and analyzed the test data off-line. The results showed that the proposed navigation system was capable of detecting obstacles and measuring their relative position.

Key words: kinematic GPS, obstacle detection, camera image, taxi guidance

概 要

空港周辺での運行効率と飛行安全の向上は、航空技術における最大の課題の一つである。そのため、衝突回避機能を含む自律的な管制を目指すフリーフライトと、カテゴリー C

* 受付け 平成 11 年 7 月 9 日受付 (received 9 July 1999)

* 1 飛行システム総合研究グループ研修生, 電気通信大学大学院 (The University of Electro-Communications)

* 2 飛行研究部 (Flight Division)

基準の計器着陸を可能にする高精度な衛星航法の研究が重要である。本報告では、航空機が誘導路を走行するタクシーガイダンスのフェーズに焦点をあて、精密測位だけでなく衝突回避のための障害物検知を衛星航法(キネマティックGPS)とカメラ画像を複合化させて行う航法システムを構築する。ここで考案した障害物検知の手法は、キネマティックGPSによる人工視界とカメラ画像の差から障害物を検知するというもので、本研究で初めて提案されたものである。本システムにより前方の障害物の検知とその相対位置(距離と方向)の計測まで行うことができ、これによりタクシーガイダンスにおける自律的な管制誘導が可能となる。

本研究では、提案する手法による障害物検知の性能を誘導路上で実際に評価するため、自動車を使ったキネマティックGPS/カメラの実験システムを構築し、そのデータをオフライン解析した。その結果、所期の目的通り障害物の検知と相対位置の計測が可能であることを実証した。

1. はじめに

民間航空機の空港利用は過去十数年間に大きく増加し、それともなう空港周辺での航空交通量の増大により、地上の管制官がレーダで航空機の位置を把握して安全にしかも効率よく管制することが困難になりつつある。また、離着陸時にその70%を占める航空機の事故が過去十年以上、民間航空機分野では減少していないという現実がある。このように、空港周辺での運行効率と飛行安全の向上は、航空技術における最大の課題の一つである。

前者の運行効率の向上については、自律的な管制を目指すフリーフライトと呼ばれる方式が近年注目を集めている。これは管制官に飛行のクリアランスをすべて保証してもらうのではなく、機体側でも豊富な航法情報をもとに自律的に衝突回避を含む飛行計画を策定し、空港への進入着陸を行うものである^{1),2)}。これにより、地上の管制官の負荷を減らすことができる。後者の飛行安全の向上に関しては、IFR(Instrumentation Flight Rule, 計器飛行規則)をあらゆる民間航空機で採用できるよう、衛星航法システムを使った航法装置の高精度化、低価格化、ヒューマンインタフェースの性能向上が一つの解決策として望まれている³⁾。

上記は飛行中を対象とした技術課題であるが、実際は空港面内でも同様の問題が起きている。すなわち、タクシーガイダンス(誘導路上での誘導)時の管制ミスや操縦ミスによる運行遅れや航空機事故は決してまれではなく、過去30年間の統計によれば全事故に占める誘導路上での事故は5%にもおぼり、これは全飛行時間の60%を占める巡航時と同じ事故率である。したがって、衝突回避能力をもつ自律的な管制機能と、精密な位置決め能力をもった航法システムによる計器誘導の開発が、タクシーガイダンス・フェーズでも求められている^{4)・6)}。

タクシーガイダンス・フェーズで、誘導路上における自機の位置を正確に求めるには衛星航法が適している。

これは、従来のILS(Instrumentation Landing System, 計器着陸システム)が滑走路のみでしか、いわゆるカテゴリーC(決心高度0m)の航法精度要件を満足できないのに対して、衛星航法は利用性(availability)が高く、空港面内のどこでも正確な位置を求めることができるからである。衛星航法として代表的なものにGPS(Global Positioning System, 全地球測位システム)がある。

GPSは、米国国防総省が軍用に開発し民間利用もされるようになった全天候型の電波航法システムで、自律的にいつでもどこでも測位が可能である。GPSの測位精度は、単独測位では約100m、疑似距離を用いたディファレンシャルGPS(Differential GPS, 相対測位)では数mであるが、キネマティックGPS(Kinematic GPS, 搬送波位相データを用いたディファレンシャルGPS)では数cmの精度が可能である⁷⁾。さらにこのキネマティックGPSを応用すれば、航空機の3軸姿勢決定を0.1度以内の精度で行うことも可能である⁸⁾。

この高精度なGPSをタクシーガイダンスに用いる研究は近年活発に行われており⁵⁾、例えばカテゴリーCの環境下でのタクシーガイダンスを目指し、誘導路のマップ上に自機の位置を精度良く示すディスプレイを作成し、パイロットに表示する研究がある⁹⁾。これに、姿勢も計測できる高精度なキネマティックGPSを用いれば、誘導路の2次元マップのみならず、地形図も利用して航空機の前方向にある誘導路を含む視界を再現した人工視界(Synthetic Vision)を作成し、パイロットに表示することもできる。しかし、衝突回避能力をもつ自律的な管制機能を実現するためのタクシーガイダンス航法を考えたときには、自機の位置を精度良く知り、人工視界を表示するだけでは不十分で、自機の障害物となる他の移動体(航空機のみではなく車両や人間を含め)との相対位置関係も正確に把握する必要がある。

障害物との相対位置を知り衝突回避を行う方法としては2種類考えられる。一つは、管制塔で空港面内に存在

するあらゆる移動体の位置を管理する方法で、それをもとに誘導路上でのクリアランスを確保し、安全にタクシーガイダンスを実行させる。管制塔で移動体の位置を知るには、移動体全部にGPSなどの航法装置をもたせ、その航法情報をデータリンクを介して取得する方法と、空港に監視レーダを設置してその情報から移動体の位置を知る方法がある。どちらも盛んに研究が行われているが、インフラ整備に大きなコストが掛かることと、管制塔で大量の情報を一元管理する負荷の軽減が技術課題である。

もう一つの手法は、フリーフライトと同じ概念の自律的な衝突回避機能を実現する方法である。そのためには、管制塔ではなくタクシーガイダンスを行う航空機自らが障害物の位置情報を獲得しなければならない。本研究では、空港に監視レーダやデータリンクといったインフラを整備することなしに、自律的に障害物の位置情報を獲得する手段として、航空機に搭載されたカメラの画像を用いる方法を提案する。

カメラを用いた障害物検知の研究は、航空機のタクシーガイダンス以外でも、自動車の分野でITS(Intelligent Transport System, 高度道路交通システム)の一環であるAHS(Automated Highway System, 自動運転道路システム)やASV(Advanced Safety Vehicle, 先進安全自動車)において活発に行われている¹¹⁻¹⁴⁾。しかし、これらカメラのみを用いた障害物検知は道路が直線か曲率の緩いカーブが続く環境(枠組み, フレーム)での使用を前提としており、図1.1に示すように直線と比較的急なカーブが複雑に組み合わせられた空港の誘導路には適さない。またカメラ画像(単眼視)のみを用いる場合は、路面の傾斜によりカメラの姿勢が上下したときに障害物の相対位置の推定精度が悪くなるという欠点もある。

本研究はカメラ画像データをキネマティックGPSと複合化して障害物を検知し、その相対位置関係まで推定するシステムを構築し、自律的なタクシーガイダンス航法

を実現することを目的とする。その特長は、キネマティックGPSの高精度位置情報と姿勢情報を用いて人工視界を作成し、誘導路の形状の変化やカメラの姿勢変動の影響を受けることなく、カメラ画像から障害物情報のみを抽出し、相対位置を正確に計測することができるという点である。このようにGPSを障害物検知に応用した研究例はなく、本研究で初めて提案されたものである。

2. 障害物検知システムの概要

2.1 システム構成

タクシーガイダンス時の航法誘導制御系における障害物検知システムの位置づけと、そのシステム構成を図2.1に示す。

空港に障害物が存在しないと仮定すれば、航法システムで自機の位置と姿勢を得て誘導制御システムに送り、それに基づいて誘導制御を行えばよい。しかし、障害物の存在する可能性のある空港でタクシーガイダンスを行う場合には、自機の航法情報の他に障害物情報(障害物があるか否かとその相対位置)を誘導制御システムに教える必要がある。この障害物情報を生成するシステムが障害物検知システムである。誘導制御システムは、障害物検知システムにより障害物が発見され、その相対位置を知らされたら、機体を停止させる、または障害物を回避するなどの判断を下し、機体の誘導制御を行う。これは、パイロットが計器誘導を行なう場合でも同様である。

本研究で提案する障害物検知システムが必要とする入力、視界にある誘導路の形状を知るための航法情報(自機の位置、姿勢)および誘導路地図データと、障害物情報を取り込むためのカメラ画像である。障害物検知システムと誘導制御システムに自機の航法情報を送る航法システムでは、衛星までの疑似距離と衛星位置などを用いてキネマティックGPSによる自機の精密測位を行う。

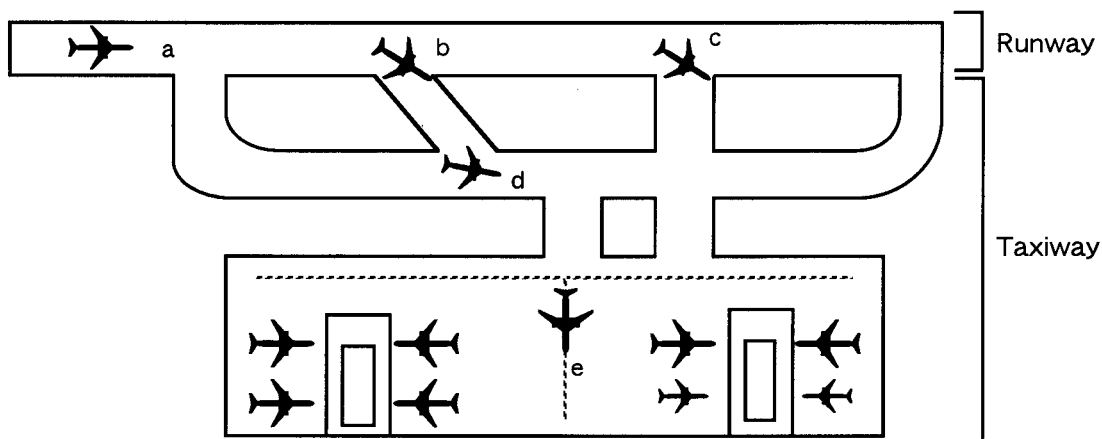


図 1.1 誘導路の模式図

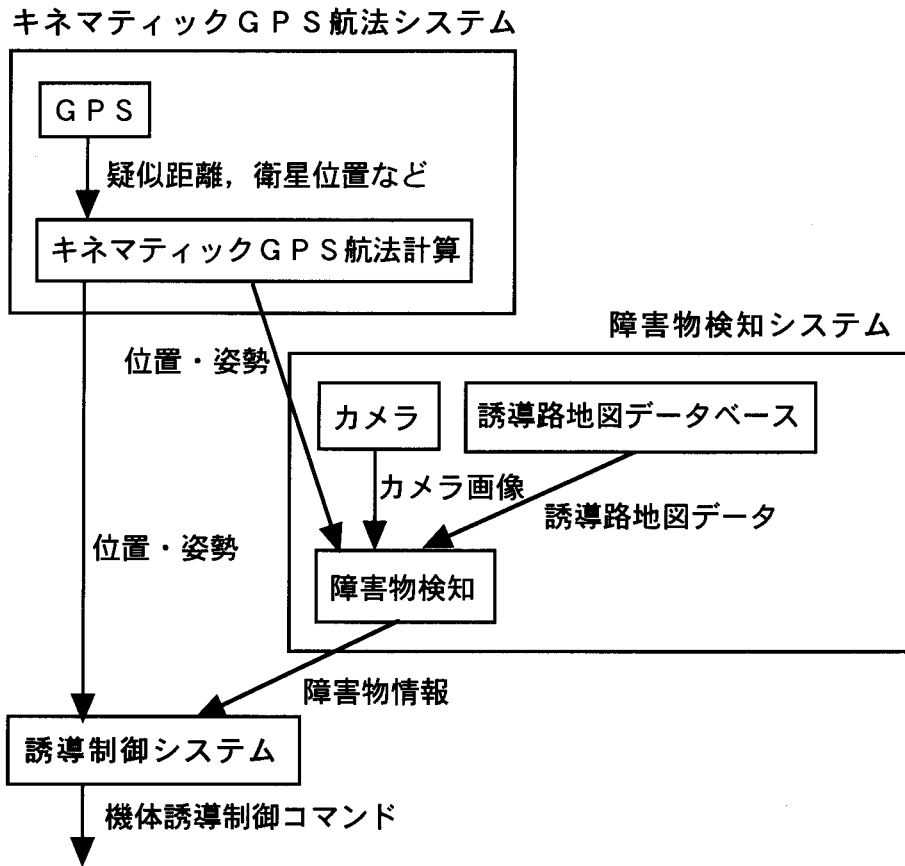


図 2 . 1 タクシーガイダンス時の航法誘導制御系における障害物探知システムの位置づけ

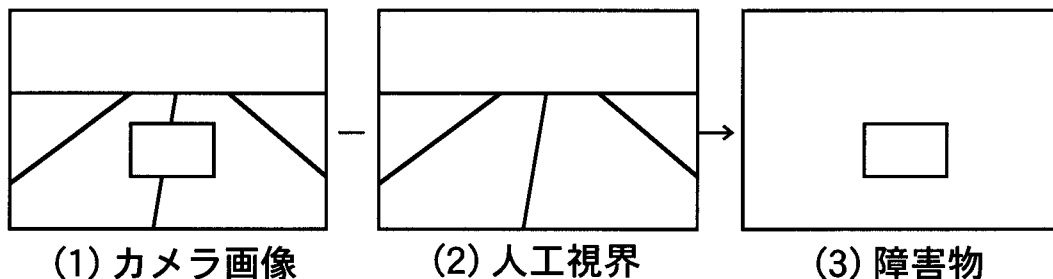


図 2 . 2 障害物探知手法の概念図

2 . 2 障害物検知アルゴリズム

キネマティックGPS単独では誘導路上での位置・速度および時刻の情報を得ることはできるが、時刻とともに位置の変化するような障害物に関する情報は得られない。一方、カメラ画像単独では、空港内の誘導路のように直線コースとカーブコースの組み合わせになるような複雑な背景の下で、さらに自機の位置も移動するという状況では、カメラ画像上での背景と障害物の分離は簡単ではなく、障害物までの距離と方向を検知することは難しい。

そこで本研究では、キネマティックGPSとカメラ画像がそれぞれ持っている情報を活かし、図 2 . 2 に示され

る概念に従って障害物検知を行う。基本的なアイデアは、「航空機の前方の視界を映したカメラ画像から、誘導路の形状など既知の部分(背景)を消去すると障害物が残る」とするものである。すなわち、

航空機の前方の誘導路をカメラ画像に撮り、
同時にそのカメラ画像に映っていると予想される
誘導路の人工視界を作成し、

人工視界とカメラ画像の差分をとる、
ことによって障害物を残そうという考え方である。さらに、
で障害物が画像上で得られたら、キネマティックGPSのデータを併用して障害物までの距離と方向も得る

ことができる。

次にこの概念をどのようにしてアルゴリズム化するかについて述べる。図 2. 3 に障害物検知アルゴリズムのフローを示す。

障害物検知アルゴリズムは、(a)人工視界作成部、(b)カメラ画像処理部、および(c)障害物抽出部の3つに大別できる。これらは図 2. 2 の障害物検知の概念に対してそれぞれ、(a)は、(b)は、(c)は に対応する。以下では、各部分の機能・役割について述べる。

(a) 人工視界作成部

人工視界作成部では自機のカメラに映っているであろう誘導路の見え方を再現した人工視界を作成する。この人工視界はカメラ画像から取り出した情報と比較して障害物を見つけるためのものであり、色を付けるなど必要以上に細かく誘導路を再現することはせず、簡潔な線分集合で表現する。

(b) カメラ画像処理部

カメラ画像処理部ではカメラから画像データを受け取り、線分集合を抽出する。後に障害物抽出部でこの線分集合と人工視界とを比較する。カメラ画像の処理結果を線分集合とすることには、人工視界と比較対象をそろえるという理由もあるが、点集合などよりも線分の方が持つ情報量が多く障害物検出時の間違いが少ないという理由もある。この線分集合はセンターラインなど誘導路の形状に関する情報のほか、もし前方に障害物があれば障害物の情報も含む。線分集合を取り出す範囲は、誘導路上に存在する障害物が安全上問題になるという理由から

誘導路領域のみに限る。このとき、誘導路領域の識別には (a) で作成した人工視界を用いる。

(c) 障害物抽出部

障害物抽出部では、人工視界とカメラ画像から抽出した線分との対応をとり、障害物を取り出す。すなわち、誘導路と障害物両方の情報を含むカメラ画像の線分集合から人工視界を用いて背景となる誘導路の部分の線分を消し、障害物を取り出す。ここで人工視界とカメラ画像から抽出した線分との対応付けは、人工視界をテンプレートとしたマッチングにより行う。そして最後に画像上での障害物の位置から障害物までの距離と方向を推定し、この結果を誘導制御システムへ渡す。

このアルゴリズムは人工視界作成から画像処理、障害物抽出まで行ってはじめて一組のデータを処理したことになる。連続的に障害物情報を抽出する場合は、入力データの取得（地図データの場合は読み込み）から障害物までの距離と方向を導くまでを繰り返し行う。

3. 人工視界の作成

3.1 人工視界作成アルゴリズム

人工視界の作成においては、カメラに映る誘導路をより正確に再現することが重要である。正確な再現ができていなければ、カメラ画像との対応付けの計算量が増えるだけでなく、対応付け自体が不可能になり、障害物が検出できない可能性もある。そこで本研究では、キネマティック GPS による高精度なカメラの位置・姿勢を用いて、さらにまたキネマティック GPS によって求めた高精

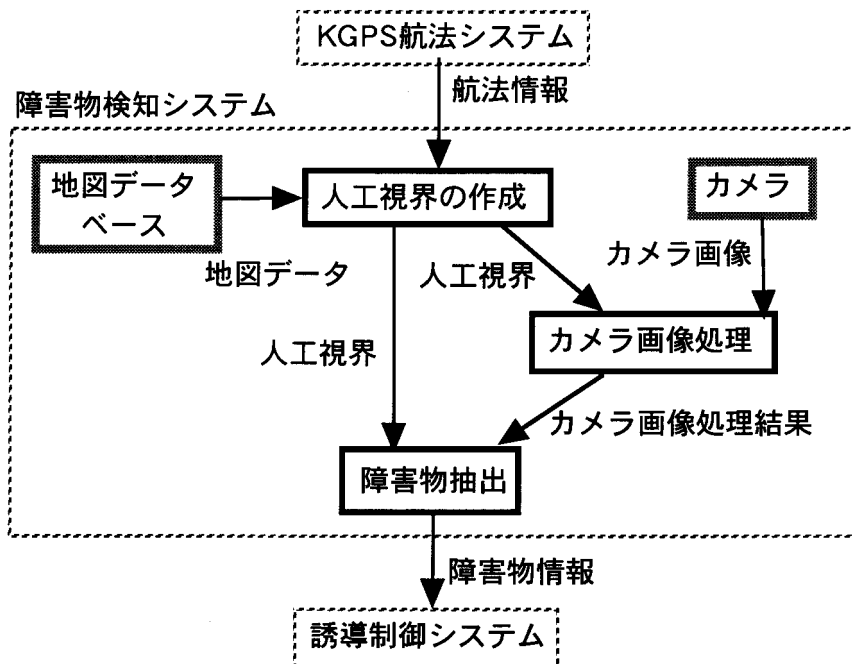


図 2. 3 障害物探知アルゴリズム

度な誘導路の地図データを投影変換することでこれを可能にした。投影変換はカメラ画像の再現などによく用いられる手法であるが、元のデータであるカメラの位置・姿勢と地図データを正確に与えることで、カメラ画像に極めて近い誘導路の再現ができる。図3.1に人工視界の

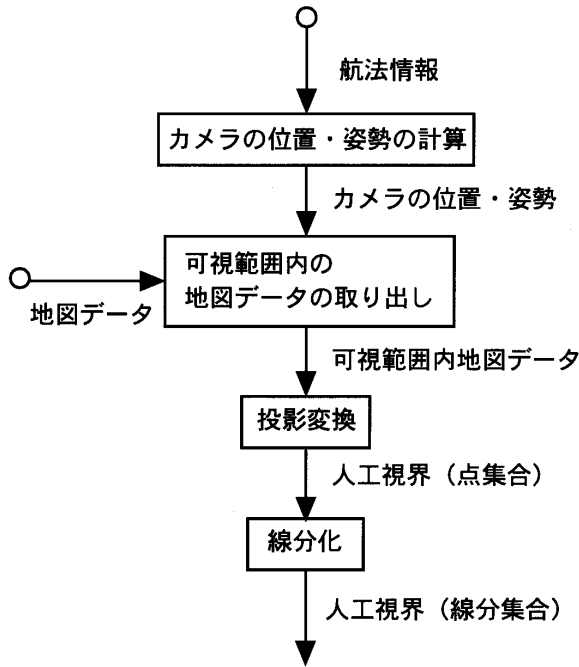


図3.1 人工視界作成手順

作成手順を示す。

人工視界作成アルゴリズムについて述べる前に、アルゴリズムに必要な座標系とデータを定義する。

人工視界の作成に必要な座標系は次の3つである(図3.2):

- ・WGS84系 (World Geodetic System 1984)
- ・局所固定水平面座標系
- ・カメラ画像座標系

WGS84系はGPS測位における基準座標系であり、座標系の原点を地球重心とし、地球に固定した(地球の自転によって回転する)直交座標系である^{15), 16)}。このことから、WGS84系を地心地球固定系(ECEF, Earth-centered, Earth-fixed system)と呼ぶことがある。GPSでは、この座標系とともに地球形状としての準拠基準回転楕円体(以後、準拠楕円体と言う)が定義されている。準拠楕円体は、赤道面平均半径(a_e)と扁平率(f)によって一意に定義できる。これらに関するGPS採用値を、図3.2(a)の表に示す。また同表には、重力パラメータ、平均自転速度、光速の基本物理定数に対するGPS採用値も示されている。GPSの測位計算では、定義されたこれらの値を使うことが要求されている。WGS84系に関する位置は、3次元直交座標表示のほか、この準拠楕円体に対する幾何学的な測地座標表示、すなわち緯度、経度、高度によっても表される。

局所固定水平面座標系は、地球上の適当な位置に原点

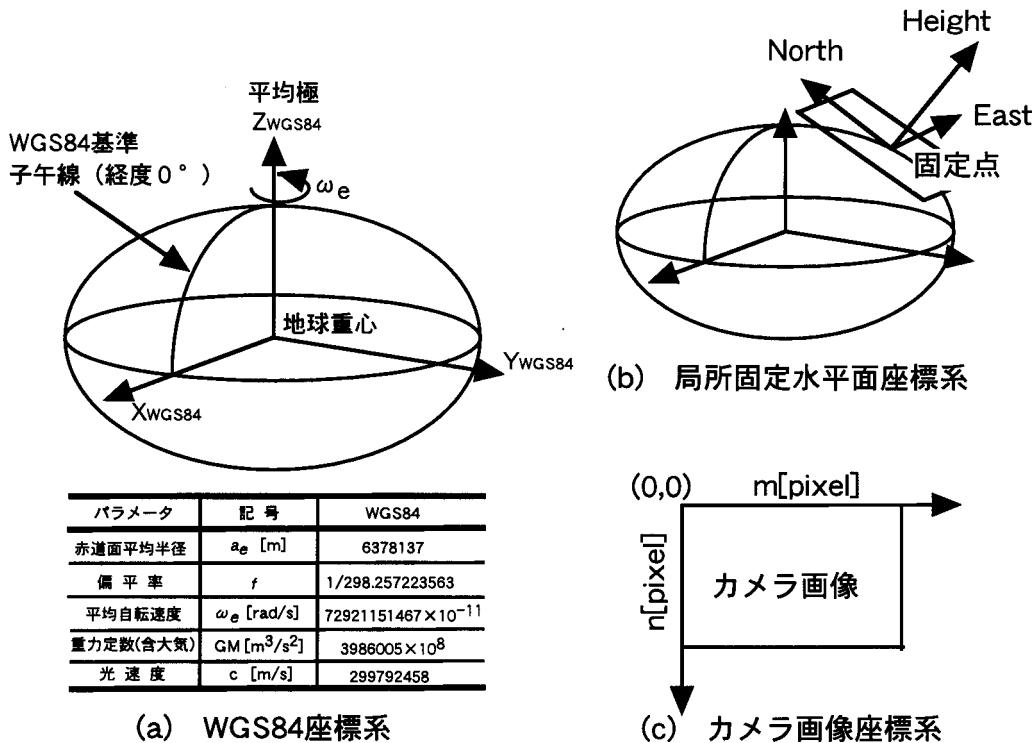


図3.2 座標系の定義

を固定した 3 次元直交座標系 (North, East, Height) である。WGS84 系の準楕円体に関して、鉛直方向に Height 軸をとり、Height 軸に垂直な面内で局所北極方向に North 軸を、真東方向に East 軸を定める。図 3. 2 (b) では座標原点は準楕円体の表面上の一点となっているが、このような座標系は任意な固定点において定義される。

カメラ画像座標系は、図 3. 2 (c) に示すように、カメラの撮像面を定義する 2 次元直交座標系 (m, n) であり、座標原点は本研究においてはカメラ画像の左上隅にとる。

人工視界の作成に用いるデータは、図 3. 1 に示すように、人工視界作成部の入力である自機の航法情報 (位置, 姿勢) と誘導路の地図データである。自機の航法情報はもともと、位置が WGS84 系上での緯度, 経度, 高度として、姿勢角は複数の GPS アンテナの相対位置から局所固定水平面座標系に関して計算されるロール角, ピッチ角, ヨー角として与えられる。これらの情報は誘導路の適当な地点に固定した局所固定水平面座標系に関するカメラの位置, 姿勢に変換される。本システムではカメラを航空機に固定すると仮定しているので、自機の位置, 姿勢からカメラの位置, 姿勢は幾何学的に一意に求めることができる。なお、カメラの姿勢はさらに視線ベクトルの方向余弦 (仰角, 方位角) と、視線ベクトル回りの回転角 (誘導路が傾斜している場合に重要) に変換する。キネマティック GPS による自機の位置, 姿勢の推定と座標変換については 3. 2 節で詳述する。

誘導路の地図データはあらかじめシステムが持っている地図データベース (誘導路の特徴点の位置座標からなる集合) から読み出す。特徴点の位置座標はカメラの位置, 姿勢と同じ局所固定水平面座標系で表されている。地図データベースに含まれる各点には、位置座標の他に誘導路を線で表現するためにどの点とどの点を結ぶかを示すラベルが付けられている。データベースからの地図データの読み出しは、カメラの位置, 姿勢に応じて参照範囲が変わるが、元となる地図データベースの中身は誘導路の形状が変わらない限り変更を要しない。地図データの読み出し範囲については本節で後述する。また、地図データベースの作成方法については 3. 3 節において詳述する。

人工視界作成アルゴリズムは図 3. 1 に示すように、カメラの位置, 姿勢の計算, 可視範囲内の地図データの読み出し, 投影変換, 線分化の 4 部分から構成される。

カメラの位置, 姿勢の計算

自機の位置, 姿勢から自機に対するカメラの設置位置に従って、カメラの位置, 姿勢を幾何学的に計算する。すなわち、自機の位置を r_b^L 、姿勢角を方向余弦行列 C_b^L で

表すと、

$$r_c^L = r_b^L + C_b^L r_c^B \tag{3.1}$$

で、カメラの局所固定水平面座標系での位置 r_c^L が求まる。ここで r_c^B は自機に対するカメラの設置位置である。また、カメラの設置姿勢角を方向余弦行列 C_c^B で表すと、

$$C_c^L = C_b^L C_c^B \tag{3.2}$$

で、カメラの局所水平面座標系に対する姿勢角が求まる。なお、本報告では計算量を減らすため、カメラの姿勢角として 9 つの要素をもつ C_c^L ではなく、視線ベクトルの方向余弦 (u, v, w) とその軸まわりの回転角 を用いる (3. 2 節参照)。方向余弦は、カメラの光軸を Z 軸とすると C_c^L の 3 行目の要素となり、回転角も C_c^L 行列の 1 行目または 2 行目の要素から容易に求まる。以後のアルゴリズムの記述では (u, v, w) と 使って定式化する。

可視範囲内の地図データの読み出し

次に地図データベースからカメラのフレームに収まる範囲 (可視範囲) 内の誘導路地図データを読み出す。カメラから見える範囲は本来図 3. 3 (a) のように 5 面体の内部になる。しかし、本システムでは地図データが誘導路の存在する範囲内の誘導路の特徴点と限られており、データ量が少ないため、厳密にカメラから見える範囲を制限しなくても、計算量が膨大になることはない。従っ

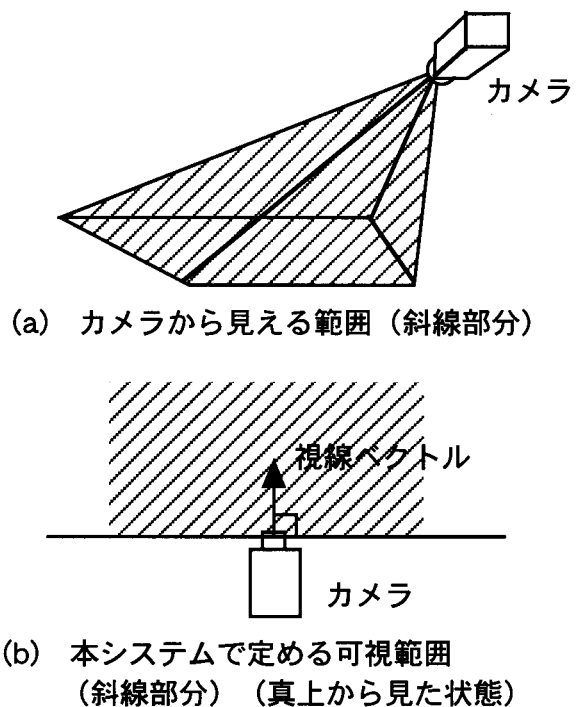


図 3. 3 可視範囲

て図3.3(b)のように局所固定水平面座標系上でカメラの視点(位置)を通り視線ベクトル(姿勢)に垂直な平面より前方にある範囲を全てカメラから見える範囲と定義する。この際カメラより後方の地図データを使用しないのは、投影変換で不都合が生じないようにするためである。なお、地図データが広範囲に渡り、データ量が膨大になる場合には、計算量を減らすために5面体を考慮して可視範囲を決定しなくてはならない。

さて、図3.4(XY平面は水平面に平行、Z軸は鉛直上向き)において、カメラの視点位置を $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 、カメラの視線ベクトルの方向余弦を (u, v, w) とすると、カメラの視線ベクトルをXY水平面上に投影した直線の方程式は

$$u(x - x_0) - v(y - y_0) = 0 \quad (3.3)$$

となる。さらに上式と直交し、カメラの視点を通る平面Aの方程式は

$$u(x - x_0) - v(y - y_0) = 0 \quad (3.4)$$

である。

ここで可視範囲内にあるかどうかを判定したい線分の端点を $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ とすると、次の2つの不等式がともに満たされれば、線分 P_1P_2 は視界内にあり、満たされなければ視界外である。

$$\begin{aligned} u(x_1 - x_0) - v(y_1 - y_0) &\geq 0 \\ u(x_2 - x_0) - v(y_2 - y_0) &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

もしどちらか一方が満たされ、もう一方が満たされない場合は、線分 P_1P_2 と平面Aは交わる。ゆえに上記の不等式が満たされなかった方の線分端点を平面Aとの交点へ移動し、満たされた方の線分端点と組み合わせ、これを視界範囲内にある線分とする。例えば、点 P_2 が不等式を満たさなかったとすると、図3.4のように点 P_2 の位置を P_2' の位置に変更する。線分 P_1P_2' と平面Aの交点は以下の通りである。

$$\left(\begin{array}{c} \frac{u(x_1 - x_2)x_0 + v(y_1 - y_2)x_2 + v(x_1 - x_2)(y_0 - y_2)}{u(x_1 - x_2) + v(y_1 - y_2)} \\ \frac{u(x_1 - x_2)y_2 + v(y_1 - y_2)y_0 + u(x_0 - x_2)(y_1 - y_2)}{u(x_1 - x_2) + v(y_1 - y_2)} \end{array} \right) \quad (3.6)$$

投影変換

キネマティックGPSによるカメラの位置・姿勢と焦点距離を用いて地図データを中央投影変換する。この作業を終了した時点で、地図データは2次元の人工視界(点集合)となる。まず図3.5をもとに投影変換で用いる4つの座標系を次のように定義する。

XYZ座標系: カメラの位置・姿勢および誘導路地図データを定義した局所固定水平面座標系(3次元直交座標系)

X'Y'Z'座標系: カメラに固定された3次元直交座標系

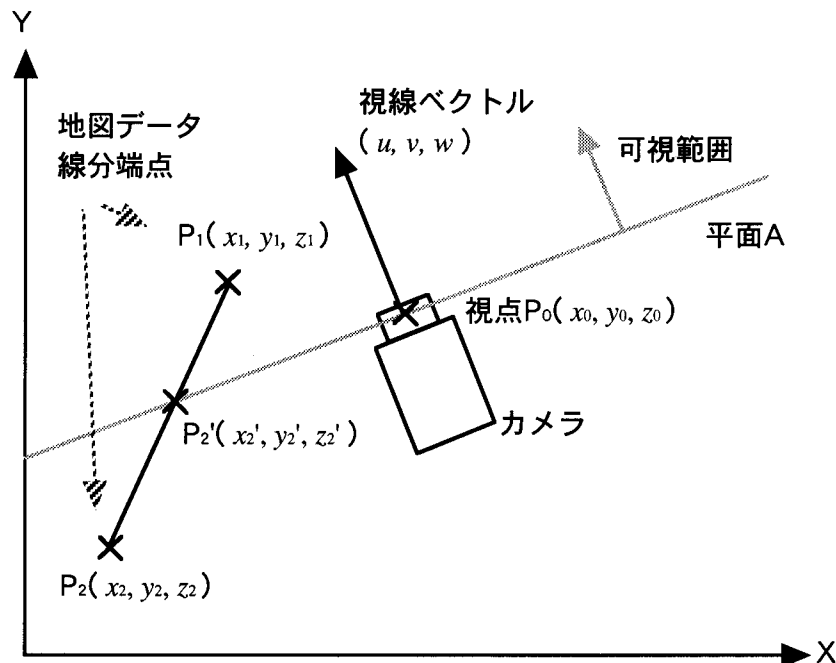


図3.4 地図データが可視範囲にあるかどうかの判定

M'N' 座標系：カメラ画像の投影面である MN 平面上に取った 2 次元直交座標系（これをカメラ画像の MN 座標と一致させるためには、投影変換の後に n = 0 に関する反転と原点の平行移動を行う。）

MN 座標系：カメラ画像の 2 次元直交座標系

前項と同じく、XYZ 座標においてカメラの位置（視点）を (x_0, y_0, z_0) 、カメラの姿勢（視線ベクトル）を (u, v, w) とする。X'Y'Z' 座標系は視点を原点とし、視線ベクトルと反対方向に Z' 軸をとり、X' 軸は XYZ 座標系の XY 平面と平行であるとする。従って X'Y'Z' 座標系は、XYZ 座標系を

- a. 視点へ平行移動
- b. Z 軸回りに回転
- c. X 軸回りに回転

することによって得られる。M'N' 直交座標系は視線ベクトル (u, v, w) に垂直で視点から焦点距離 f にある撮像面（MN 平面）上にあり、視線ベクトルと MN 平面の交点を原点とした座標系である。M' 軸と X' 軸、N' 軸と Y' 軸は平行である。

XYZ 座標系上で表した地図データの座標 (x, y, z) は、X'Y'Z' 座標系では次式のようになる¹⁷⁾。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos b & \sin b \\ 0 & -\sin b & \cos b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos a & \sin a & 0 \\ -\sin a & \cos a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

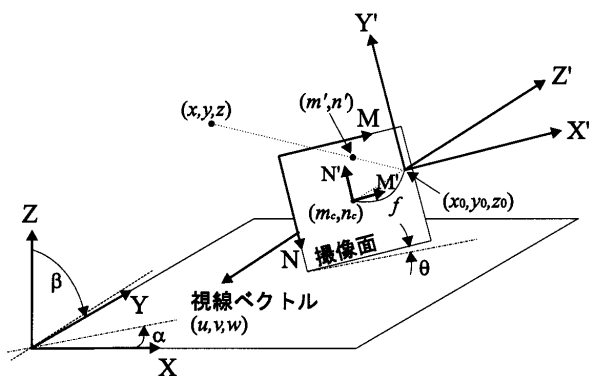


図 3.5 中心投影法における座標系

ここで Z 軸回りの回転角 a 、X 軸回りの回転角 b と、視線ベクトル (u, v, w) の関係は以下により与えられる。

$$a = \begin{cases} \cos^{-1}\left(\frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right) & (u < 0) \\ -\cos^{-1}\left(\frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}\right) & (u \neq 0) \end{cases} \quad (3.8)$$

$$b = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\sqrt{u^2 + v^2}$$

地図データの座標 (x, y, z) を M'N' 座標上に投影した座標を (m', n') とすると、 (m', n') と (x', y', z') との関係は、焦点距離 f を使って以下のように記述できる。

$$\begin{cases} m' = -fx/z' \\ n' = -fy/z' \end{cases} \quad (3.9)$$

最後に M'N' 座標系を次式によりカメラ画像の座標系である MN 座標系に変換する。

$$\begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m' \\ n' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_c \\ n_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ここで (m_c, n_c) はカメラ画像座標におけるカメラ画像の中心点の位置座標で、MN 座標系の原点を画面左上とするために足し合わせる。

誘導路の路面が視線ベクトルまわりに傾斜している場合は、(3.9) 式に、次式による視線ベクトル回りの回転角を考慮した - Z' 軸まわりの回転を加える。

$$\begin{bmatrix} m' \\ n' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m' \\ n' \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

ここで、 φ は視線ベクトル回りの回転角である。

線分化

人工視界を線分化するために、地図データのラベルに従って投影変換後の点のペアを作る。その手順を表 3.1 (a) の人工視界データ（地図データベースに含まれる局所固定水平面座標系で表された誘導路の特徴点の位置データを、 \sim の手順により MN 座標系で表した点集

表 3.1 人工視界のデータ

(a) 点集合			(b) 線分集合			
m [m]	n [m]	Label	$m1$ [m]	$n1$ [m]	$m2$ [m]	$n2$ [m]
325.92	139.62	1	325.92	139.62	328.97	136.74
328.97	136.74	1	328.97	136.74	333.62	134.28
333.62	134.28	1	353.11	126.24	353.32	126.01
353.11	126.24	2				
353.32	126.01	2				

合)の例に従って説明する。まず表 3.1 (a)のデータの1行目のラベルと2行目のラベルは同じなので、この2点を一組として線分を作ることができる。同様に2行目と3行目のラベルも同じなので一組の線分にできる。4行目と3行目のラベルは異なっているので線分にはできない。この手順を繰り返し、表 3.1 (a)の点集合の人工視界を全て線分集合にすると、表 3.1 (b)のようになる。手順から分かるように、データの格納順位は線分作成の順になっていなければならない。また、システム中ではこの線分化の作業を行うとき、同時に各線分の長さが指定以上あるかどうかを判定し、極端に短い線分を人工視界に加えないようにしている。

以上の手順 ~ によって線分化された人工視界がカメラ画像座標系 MN 上にできる。

3.2 キネマティック GPS による航空機の位置・姿勢推定

カメラ位置の推定において m オーダーの誤差は人工視界作成にとって大きな誤差となる。図 3.6 の a は誘導路を映したカメラ画像、b は正しいカメラ位置によって人工視界を作成した例である。また同図 c はカメラ位置を右方向に 1 m ずらして作成した人工視界である(姿勢は変えない)。この図からわかるように、カメラ位置に誤差があると作成される人工視界はカメラに映っている画像とは大きく異なってしまい、カメラ画像と人工視界相互の対応が付けにくくなる。カメラの姿勢についても同様のことが言える。そのため、航空機の位置・姿勢を高精度に求めることが必要であり、キネマティック GPS は極めて有効である。本節ではキネマティック GPS による航空機の位置・姿勢推定と投影変換を容易に行うための局所固定水平面座標系への変換について説明する。

GPS 観測量とキネマティック GPS

GPS は、米国防総省が開発運用している人工衛星を利用した電波航法システムである。GPS の概要については付録 A に付す。

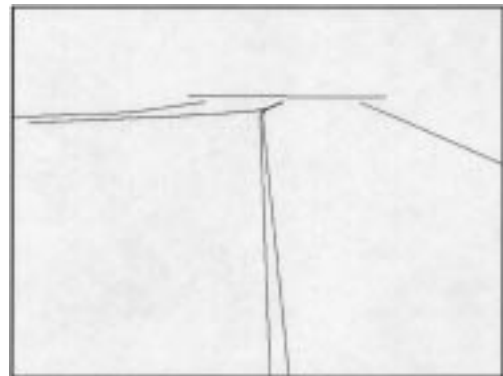
GPS 信号の C / A コードを使って観測する疑似距離は衛星から受信機までの伝搬時間に光速 c を掛けたものである。すなわち、

$$PR = c(t - t_{SV}) + \epsilon_R \quad (3.12)$$

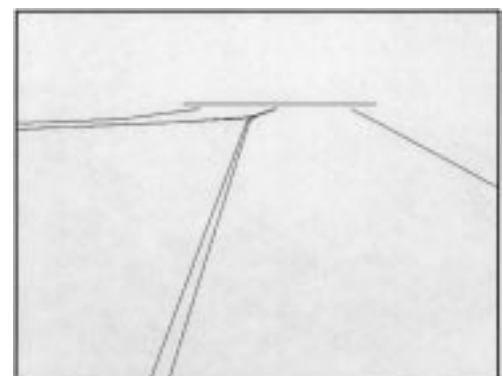
ここで、 PR は疑似距離データ、 t は受信機時計で計った電波の受信時刻、 t_{SV} は衛星時計によるその電波の送信時刻、 ϵ_R は観測ノイズである。疑似距離には様々な誤差が含まれ、それらを明示した観測方程式は次式によって与えられる。



a. 誘導路を映したカメラ画像



b. 正しいカメラ位置によって作成した人工視界



c. カメラ位置を向かって右に 1 メートルずらして作成した人工視界(姿勢は変えない)

図 3.6 カメラ位置誤差の影響

$$PR = r + d_{ion} + d_{trop} + b - b_{SV} + d_{eph} + d_{SA} + d_{sag} + d_m + \epsilon_R \quad (3.13)$$

ここで、 r は放送暦を使って計算した衛星の送信アンテナから受信機アンテナまでの幾何学的距離を表す。 b, b_{SV} はそれぞれ受信機と衛星のクロック誤差、また、 d_{ion} および d_{trop} はそれぞれ電波が電離層および対流圏を伝搬する際の遅延量、 d_{eph} は放送暦誤差、 d_{SA} は SA による誤差、 d_{sag} は Sagnac 効果(特殊相対論効果)、 d_m はマルチパスによる誤差である(いずれも距離換算)。

疑似距離を用いた測位手法として、単独測位と相対測位の二つがある。単独測位（あるいは絶対測位）は、GPS 衛星からの電波を一つの受信機で受信し、WGS84 上での絶対的な位置を知るものである。4 つ以上の衛星に対する（同時）観測データを得たとき、最小二乗法を用いて位置を推定できる。

一方、相対測位はディファレンシャルGPS（通常 DGPS と略記される）と呼ばれ、二つ以上の受信機を用いて相対的な位置決めを行う方法である。これは、位置のわかっている基準局と未知点の両方で同時に GPS 観測を行い、基準局に対する未知点の相対的な位置を知る方法である（図 3.7）。DGPS 測位の利点は、基準局と未知点での観測データの差分をとることによって、モデル化の難しい大気伝搬遅延による誤差の大部分と衛星に起因する誤差、例えば放送暦誤差、時計誤差、SA 誤差を相殺できるので、より高精度な測位が期待できることである。今、疑似距離の一重差 SD (single difference) を 2 つの受信機 i, j の衛星 k に対する疑似距離の差分

$$SD(i, j, k) = PR(i, k) - PR(j, k)$$

によって定義する。ここで $PR(i, k)$ は、受信機 i による衛星 k に対する疑似距離データを表す。このとき、 SD は (3.13) 式から次式によって表せる。

$$DPR = D_r + Dd_{ion} + Dd_{trop} + Dd_b + Dd_{eph} + Dd_{sag} + Dd_m + D_{ePR} \quad (3.14)$$

ここで D は一重差を示すオペレータである。同じ衛星に関する差分をとったため、衛星のクロック誤差が一重差では消去される。また残った大気伝搬遅延等の誤差も 2 つの受信機間の距離が短ければ、ほぼ消去される。この結果、疑似距離の一重差を用いる DGPS（コード DGPS という）では、単独測位で 100 m 程度であった精度を数 m 程度まで向上させることが可能である。

DGPS は疑似距離以外に、搬送波位相を用いても行うことができる。これを搬送波位相 DGPS、または特にキネ

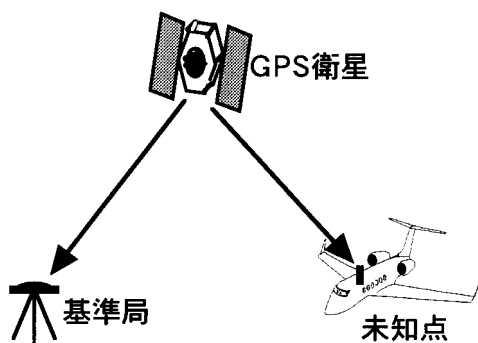


図 3.7 ディファレンシャル GPS

マティック GPS (KGPS) と呼ぶ。C/A コードによる観測ノイズが数 m であるのに対し、搬送波位相の観測ノイズは数 mm 程度と小さく、これによって数 cm から数 10 cm 台の精度を持つ相対測位が可能である。

GPS 受信機で測定される搬送波位相は、衛星からの電波の発射時刻における搬送波の位相 $\phi_{sv}(t_{sv})$ と、それを受信した時刻における受信機の時計の位相 $\phi(t)$ の差、つまり受信時における搬送波位相差である。これらの位相は搬送波の周波数を f として次式で定義される（単位：サイクル）。

$$\phi_{sv}(t_{sv}) = ft_{sv} \quad (3.15)$$

$$\phi(t) = ft \quad (3.16)$$

すなわち、それぞれの時計のゼロ時において位相はゼロとなる。したがって、搬送波位相 ψ は、

$$\psi(t) = f(t - t_{sv}) + e \quad (3.17)$$

と書ける。ここで、 e は観測ノイズである。ところが、実際に受信機で測定される搬送波位相は測定を開始した時刻 t_0 では上式の 1 波長以下の部分のみである。観測される搬送波位相を ψ_m と書くと、

$$\psi_m(t_0) = f(\psi(t_0)) \quad (3.18)$$

である。 $f(\cdot)$ は 1 波長以下の部分を取ることを示す。この結果、実際の搬送波位相 $\psi(t_0)$ は ψ_m に対して測定できない未知の整数倍のサイクル数を含むことになる。それを N とすれば、次式で表せる。

$$\psi(t_0) = \psi_m(t_0) - N \quad (3.19)$$

受信機はサイクルスリップ（移動中に電波が途切れたり、なんらかの理由により N の値が変わってしまうこと）が生じない限り、連続的に搬送波位相を積算するため、任意の時刻 t での観測値は

$$\psi_m(t) = \psi(t) - \psi(t_0) + \psi_m(t_0) \quad (3.20)$$

である。(3.19), (3.20) 式より $\psi(t_0)$ を消去すると

$$\psi_m(t) = \psi(t) + N \quad (3.21)$$

となる。 $\psi(t)$ は (3.17) 式より疑似距離と同様に変形できるので、(3.21) 式に搬送波位相の波長 λ を掛けて $\lambda\psi_m$

(t)を改めて f と書けば, 搬送波位相の観測方程式は次式で表現できる.

$$f = r - d_{ion} + d_{trop} + b - b_{SV} + d_{eph} + d_{SA} + d_{sag} + d_{m,phase} + 1N + e \quad (3.22)$$

ここで 未知の整数バイアス N はアンビギティ (ambiguity) と呼ばれる. 電離層遅延の誤差 d_{ion} の符号が負であるのは, 電離層中の位相速度がみかけ上速くなるためである.

このような高精度な観測量を用いて測位計算を行う場合, 内在する誤差をできる限り除去あるいは軽減させることが高精度測位のための条件となる. すでに述べたように一重差 SD をとることにより, 内在する誤差を軽減させることができる. さらに搬送波位相データによって高精度測位を行うキネマティック GPS では, 2 個の受信機と 2 個の衛星の組み合わせによって得られる 4 個の観測データから二重差 DD (double difference) と呼ばれる観測量を合成し (つまり, SD の差), 受信機のクロック誤差も消去する. いま DD をとるオペレータを次式で定義する.

$$D(\cdot) = (\cdot)_j - (\cdot)_i - (\cdot)_1 + (\cdot)_2 \quad (3.23)$$

ここで下付きの添え字 i, j は受信機の番号, 上付きの添え字 1, 2 は衛星番号を表す. このとき, 搬送波位相 DD は次式で与えられる.

$$D f = D r - D d_{ion} + D d_{trop} + D d_{m,phase} + 1D N + D e \quad (3.24)$$

二重差をとることにより, 2 つの受信機に共通の誤差

大気圏遅延, 衛星時計の誤差, 放送暦の誤差, SA による誤差 と, 2 つの衛星に共通の誤差 受信機時計の誤差 を相殺できる. 一方, マルチパスは衛星と受信機の組み合わせ毎に異なるため, 完全に除去することはできない.

さて, 疑似距離を用いた測位の場合は, 観測データが得られたら最小二乗法でそのまま解くことができた. しかし, 搬送波位相を用いた測位では, アンビギティが決まらない限り最小二乗法を適用することはできない. 従って, まず最初にアンビギティを知らなければならない.

リアルタイムでないキネマティック GPS の場合, 測位を開始する前に静止点でアンビギティを決定する手法を取ることができる. アンビギティは, 一旦決まれば, 次にサイクルスリップが起こるまで, あるいは衛星の組み合わせが変わるまでは同一の値を取り続けるので, 観測

値を得る度に毎回計算し直す必要はない.

しかし, 衛星からの電波が遮られるなど, 何らかの理由でサイクルスリップが起きると, 再びアンビギティ決定をやり直さなくてはならない. 移動中にサイクルスリップが起こると, それ以後の測位は不可能となる.

そこでアンビギティを移動中に高速に解くアルゴリズムがいろいろ研究されてきた. これらを OTF アルゴリズム (On-The-Fly Ambiguity Resolution Algorithm) と呼んでいる.

OTF アルゴリズム

最も簡単な OTF アルゴリズムは次のようである. まずはじめに疑似距離の二重差による測位解を計算する. そのためには少なくとも 4 衛星が同時に可視でなければならない. 可視衛星が 4 個の場合, 3 個の独立な二重差データを合成でき, 従って 3 次元位置座標について解くことができる. 次いでこの測位解を用いてアンビギティ解の候補集合 (ひとつひとつはある整数値の組み合わせ) を求める. それぞれの候補に関する (搬送波位相二重差の観測残差の) 統計量を仮説検定する. これが可能であるためには, 可視衛星が少なくとも 5 個必要である. 理想的には可視衛星は多いほどよく, 例えば 7 ~ 8 衛星が同時に見えるのがよい. 最後まで棄却されずに残った候補をアンビギティ解とする (図 3.8). 以下において, 最小二乗法を用いたアンビギティを同定するプロセスについて述べる.

疑似距離の二重差は搬送波位相のそれと同様に次式のように表される.

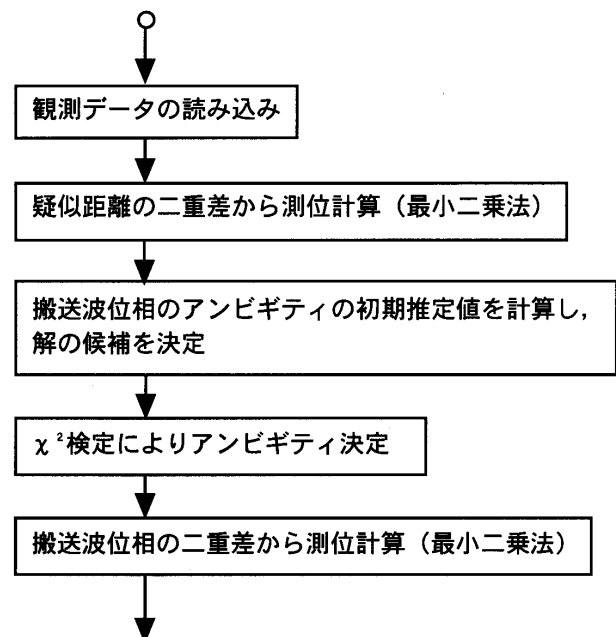


図 3.8 OTF アルゴリズムの流れ

$$D PR = D r + D d_{ion} + D d_{trop} + D d_m + D e_{PR} \quad (3.25)$$

この観測量から最小二乗法により測位解（すなわち 3 次元位置座標）を得たのち、搬送波位相二重差のアンビギティの初期推定値を次式によって定める。

$$D \hat{N}_0 = idnint \left(\frac{Df - Dr - Dd_{trop}}{1} \right) \quad (3.26)$$

ここで、 $idnint$ は四捨五入整数化操作を示す。真のアンビギティは初期推定値を中心とする次の範囲にある。

$$D \hat{N}_0^i - k s_N \leq D \hat{N}^i \leq D \hat{N}_0^i + k s_N \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3.27)$$

ここで i は、測位解を計算するために用いた衛星ペアを表わし、通常 3 ペアである。 s_N はアンビギティの初期推定誤差である。 k は 2 または 3 の値をとり、それぞれ有意水準 95% または 99% に対応する。

アンビギティ解の候補が得られたら、次に各候補に対して今度は搬送波位相二重差データを用いて測位計算を行い、観測領域での棄却検定を行う。すなわち、観測残差の二乗和を計算し、 χ^2 検定により次式を満たす候補を棄却する。

$$\frac{v^T C^{-1} v}{df} > \frac{c_{df, 1-a}^2}{df} k_1 \quad (3.28)$$

df : degree of freedom (= $nsv - 4$)

ここで v は残差ベクトル、 a は検定の有意水準を示す。 k_1 は許容範囲を表すパラメータで経験的に定める。また nsv は、観測した衛星数である。この棄却検定によってアンビギティの解の候補が一組になればそれを解とし、複数の場合は次のエポックに移り、棄却検定を再度行う。

正しいアンビギティ解が同定されたら、最後に搬送波位相の二重差から最小二乗法により、受信機の位置座標を推定する。

以上で自機の位置を得られたが、この位置座標は WGS84 座標系上での緯度・経度・楕円体高である。投影変換を行うためにはこれを局所固定水平面座標系上へ変換しなければならない。

局所固定水平面座標系への変換

WGS84 座標系と準拋楕円体の関係は図 3.2 に示すとおりである。準拋する回転楕円体に対して地球表面上の位置を緯度・経度・楕円体高で表した座標は測地座標系と呼ばれる。この測地座標系から所望の局所固定水平面座標系への変換は、まず地球中心固定座標系への変換、次

いで局所固定水平面座標系への変換の 2 段階で行う。

測地座標系から地球中心固定座標系への変換は次のように行う。ある観測点の測地座標が経度 l 、緯度 f 、楕円体高 h で表わされるとき、この地球中心固定座標 (u, v, w) は、

$$\begin{aligned} u &= (N+h) \cos f \cos l \\ v &= (N+h) \cos f \sin l \\ w &= (N(1-e^2)+h) \sin f \end{aligned} \quad (3.29)$$

となる。ただし、

$$N = a_e / (1 - e^2 \sin^2 f)^{1/2} \quad (3.30)$$

$$e^2 = f(2-f) \quad (3.31)$$

で、それぞれのパラメータは図 3.2 (a) に示した¹⁶⁾。

局所固定水平面座標系は、前述の通り座標系の原点として誘導路近傍の任意の地点をとり、Z 軸はその地点の鉛直線方向、X 軸の方向はその地点での水平面内で真北方向に、Y 軸はその地点での真東方向とする。地球中心固定座標系から上記のような局所固定水平面座標系への変換は、平行移動と座標軸回転をとともなう（図 3.9）。この変換を式に示すと

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

ここで、 (x, y, z) 、 (u, v, w) はそれぞれ局所固定水平面座標系、地球中心固定座標系上での測位点 P の座標である。 (u_0, v_0, w_0) は地球中心固定座標系上での局所固定水

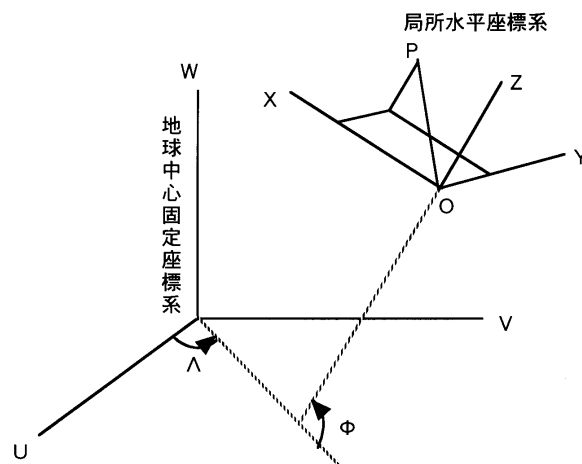


図 3.9 局所固定水平面座標系と地球中心固定座標系

平面座標系の原点の座標， \mathbf{R} は回転行列である。

回転 \mathbf{R} を表す行列は，図 3 . 10 のように，地球中心固定座標系を W 軸回りに角度 $(180^\circ + L)$ だけ回転し，次に V 軸回りに角度 $-(90^\circ - F)$ だけ回転し，最後に V 軸を反転させる。すなわち，

$$\mathbf{R} = \mathbf{P}_2 \mathbf{R}_V(-(90^\circ - F)) \mathbf{R}_W(180^\circ + L) \quad (3.33)$$

ここで， \mathbf{P}_2 は V 軸の向きを反転させる行列

$$\mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

である。また， \mathbf{R}_V ， \mathbf{R}_W はそれぞれ V 軸， W 軸回りの回転行列，

$$\mathbf{R}_V(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{R}_W(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

F ， L はそれぞれ局所固定水平面座標系原点の緯度，経度である。

姿勢推定

次にキネマティック GPS を使った姿勢推定について説明する。本障害物検知システムにおけるカメラの姿勢は局所固定水平面座標系での方向余弦（仰角，方位角に相当する）と視線ベクトル回りの回転角で表すこととする。

いま図 3 . 11 のように航空機に 3 つのアンテナを設置しカメラは 3 つのアンテナが作る平面上に，アンテナ 2 から 1 の方向を向くよう取り付けられているとする。キネマティック GPS 測位を行い，アンテナ 1，2，3 の位置がそれぞれ (x_1, y_1, z_1) ， (x_2, y_2, z_2) ， (x_3, y_3, z_3) と計測されたとすると，カメラの姿勢（視線ベクトル）となる方向余弦 (u, v, w) は，

$$u = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \quad (3.37)$$

$$v = \frac{y_1 - y_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \quad (3.38)$$

$$w = \frac{z_1 - z_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \quad (3.39)$$

また，視線ベクトル回りの回転角 φ は

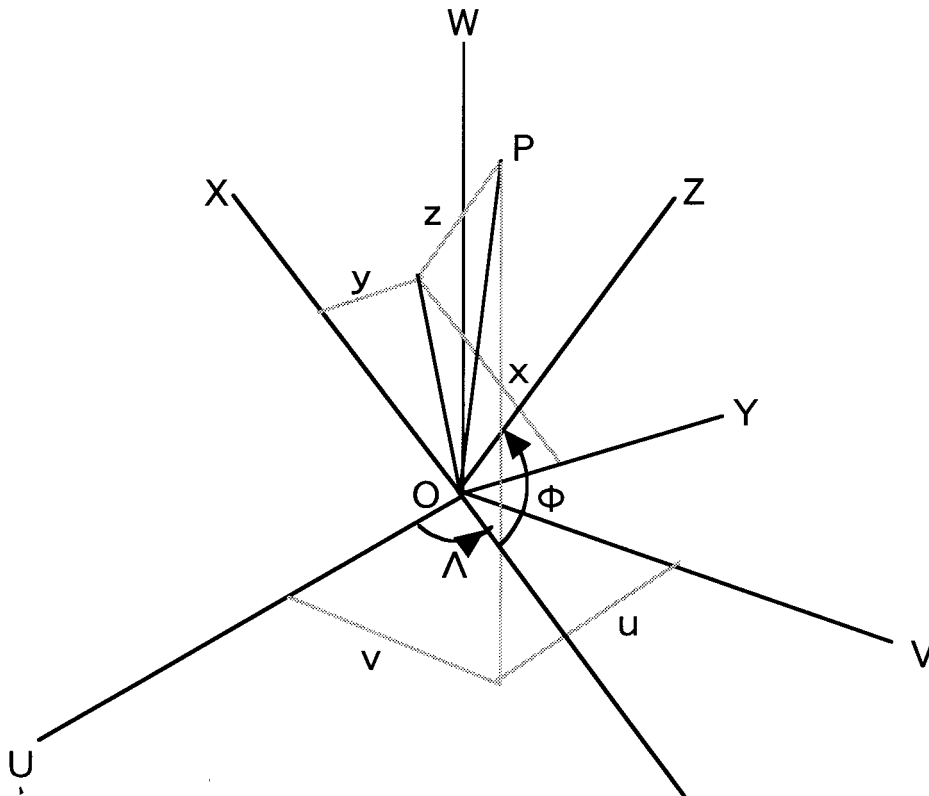


図 3 . 10 地球中心固定座標系から局所固定水平座標系への回転

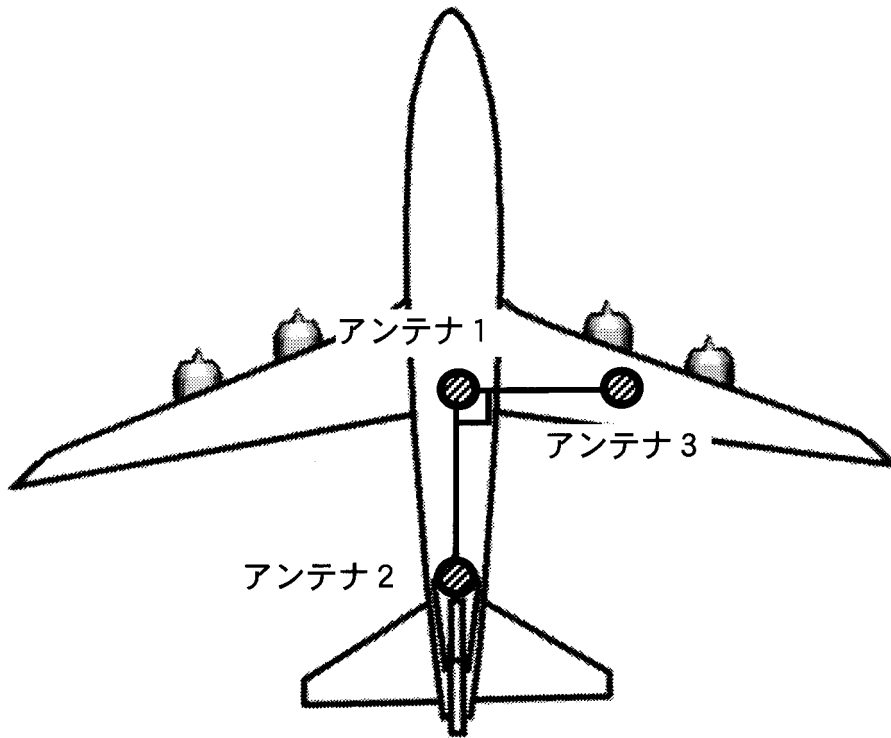


図 3.11 航空機の姿勢推定

$$q = -\tan^{-1} \left(\frac{z_3 - z_1}{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}} \right) \quad (3.40)$$

となる。

3.3 GPS 精密測量による地図データベース

人工視界の作成に必要な地図データベースの情報は誘導路の形状を表現する特徴点の集合であり、それら各点データは座標値と点相互の連結を表すラベルから成る。誘導路の特徴点としては、半恒久的に位置が不変で、かつカメラに映ると考えられる対象を含む。例えば、誘導路両端ラインや誘導路センターライン等である。各点データの座標値はカメラの位置、姿勢と同一の座標系である局所固定水平面座標系で表す。

このような地図データベースは、キネマティック GPS により誘導路の特徴的な点の測量を行い、点相互の連結を表すラベルを付けるという手順によって得られる。キネマティック GPS による測量とは、位置があらかじめ正確に分かっている地点に固定の GPS 局を置き、もう 1 台の GPS 受信機を測量する点上に一分間程度静止させて、次々と座標値を計算させていく方法である。精度が数 cm で、短時間で多数の点の位置を求めることができるので、今回のように、多数の特徴点の座標値を求めるのに適している。測量点は、直線部分は両端の点のみ、カーブの部分では直線近似した際に最低限カーブに見える程度の

表 3.2 地図データベースの例

North[m]	East[m]	Height[m]	Label
- 35.49	- 61.01	- 6.98	1
- 55.79	- 90.65	- 6.74	1
- 55.79	- 130.69	- 6.52	1
- 97.44	- 125.13	- 6.47	2
- 68.87	- 90.42	- 6.69	2
			⋮

点数とした。本研究で作成した地図データベースの例を表 3.2 に、またラベルに従って連結する点を結んだ例を図 3.12 に示す。高度の値が負になっているのは、座標原点を誘導路近傍にある建物の屋上にとったためである。

3.4 人工視界の作成例

前節までに述べたアルゴリズムにより人工視界を作成した例をアルゴリズムの流れに従って図 3.13 に示す。同図右側の写真に見える誘導路をキネマティック GPS により精密測量し、(a) のような誘導路の地図データベースを作成する。次にキネマティック GPS によるカメラの位置・姿勢を用いて、(b) のように地図データベースから可視範囲の地図データを読み出す。さらにキネマティック GPS によるカメラの位置・姿勢情報を用いて読み出した地図データを投影変換し、(c) のような人工視界を合成する。最後にこの人工視界(点集合)を線分化し、(d)

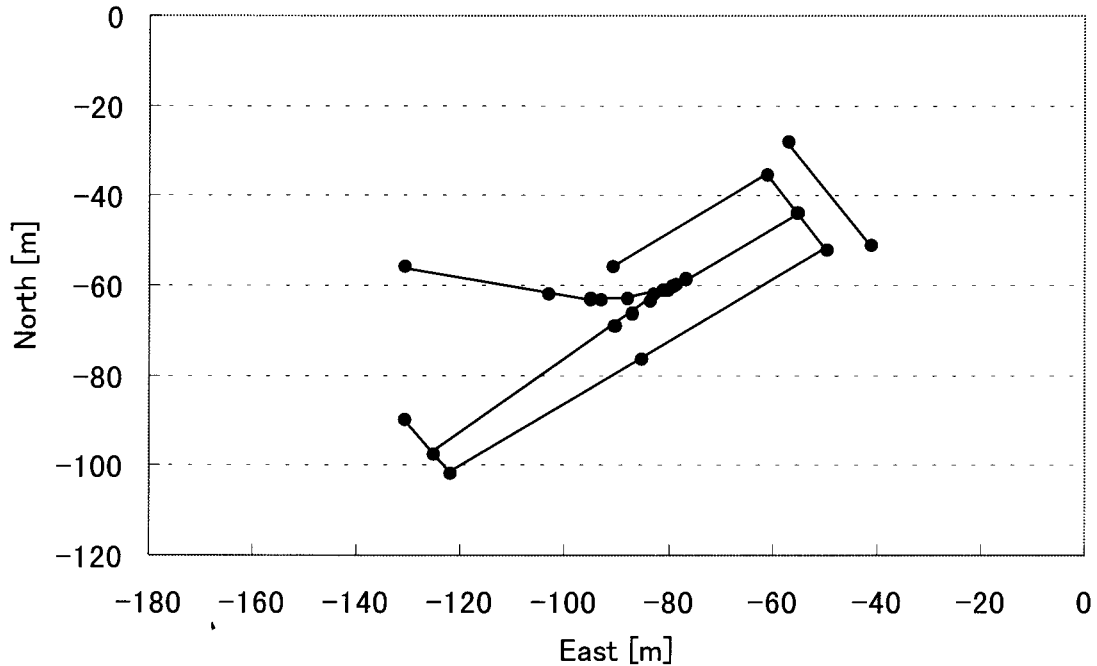


図 3.12 誘導路地図データ

のような線分集合からなる人工視界を計算する。

作成された人工視界を同写真と比較すると、このアルゴリズムによってカメラ画像に対応した人工視界の作成が可能であることがわかる。このようにほぼ正確にカメラ画像に映る誘導路を線分表現できるのは、キネマティック GPS で得たカメラの位置・姿勢が高精度であるためである。

4. カメラ画像データの処理

4.1 カメラ画像データの処理手順

カメラ画像処理部では、カメラからカメラ画像を受け取り、その画像から線分集合を抽出する。画像から直接線分を抽出することはできないので、まずエッジを抽出して、次いで線分を抽出するという2段階で行う。

本システムでカメラ画像から抽出する線分は、後に続く人工視界との対応付けでより正確に障害物を抽出するために、以下の項目を満たしていることが望まれる：

障害物の特徴ができるだけ多く線分として抽出されていること

後に続く障害物抽出の手順では、障害物に由来する線分集合から障害物の画像上での位置を決定する。従ってカメラ画像から線分を抽出する時点で障害物の線分が少ないと、誤った位置で障害物が検出されたり、障害物が検出できない可能性がある。

路面の凹凸など不必要な要素を線分として抽出しないこと

本システムでは、地図データに含まれる誘導路以外の要素に由来するものは障害物であると認識する。

従って地図データに含まれる誘導路と障害物以外の要素に由来する線分は抽出されないことが望ましい。

本来別の要素に由来する線分がつながって1本の線分として抽出されないこと

障害物と別の要素に由来する線分が1本の線分として抽出されると、後の障害物抽出でその線分が障害物として認識された場合は障害物の位置誤差が大きくなり、障害物以外であると認識された場合は抽出されるべき障害物が抽出されないという可能性がある。

角度が正しいこと

後に続く障害物抽出の手順では、カメラ画像から抽出した線分集合と人工視界との対応付けに線分間の角度を用いる。従って線分の角度がカメラ画像に忠実でないと正しく対応付けができず、障害物抽出に失敗する可能性がある。

以上の4条件を満たした線分を抽出するために、本システムでは次のような方法で線分抽出を行う。まずエッジ抽出を行う。これにより前処理の段階で色の変化の小さい路面の凹凸などの要素を排除し、逆に路面に対する色の変化が大きい障害物をエッジとして抽出する。エッジ画像から線分を抽出する際は、エッジの直線部分を抜き出すという方法をとる。これにより本来別の要素に由来する線分はつながって1本の線分として抽出されない。また、線分の角度もカメラ画像に忠実に得ることができる。また、線分を抽出する範囲は、障害物が存在する範囲が誘導路上である（誘導路上以外にあるものは航空機の進行を妨げないので障害物ではない）という理由から、カメラ画像全体ではなく誘導路の領域のみに限る。

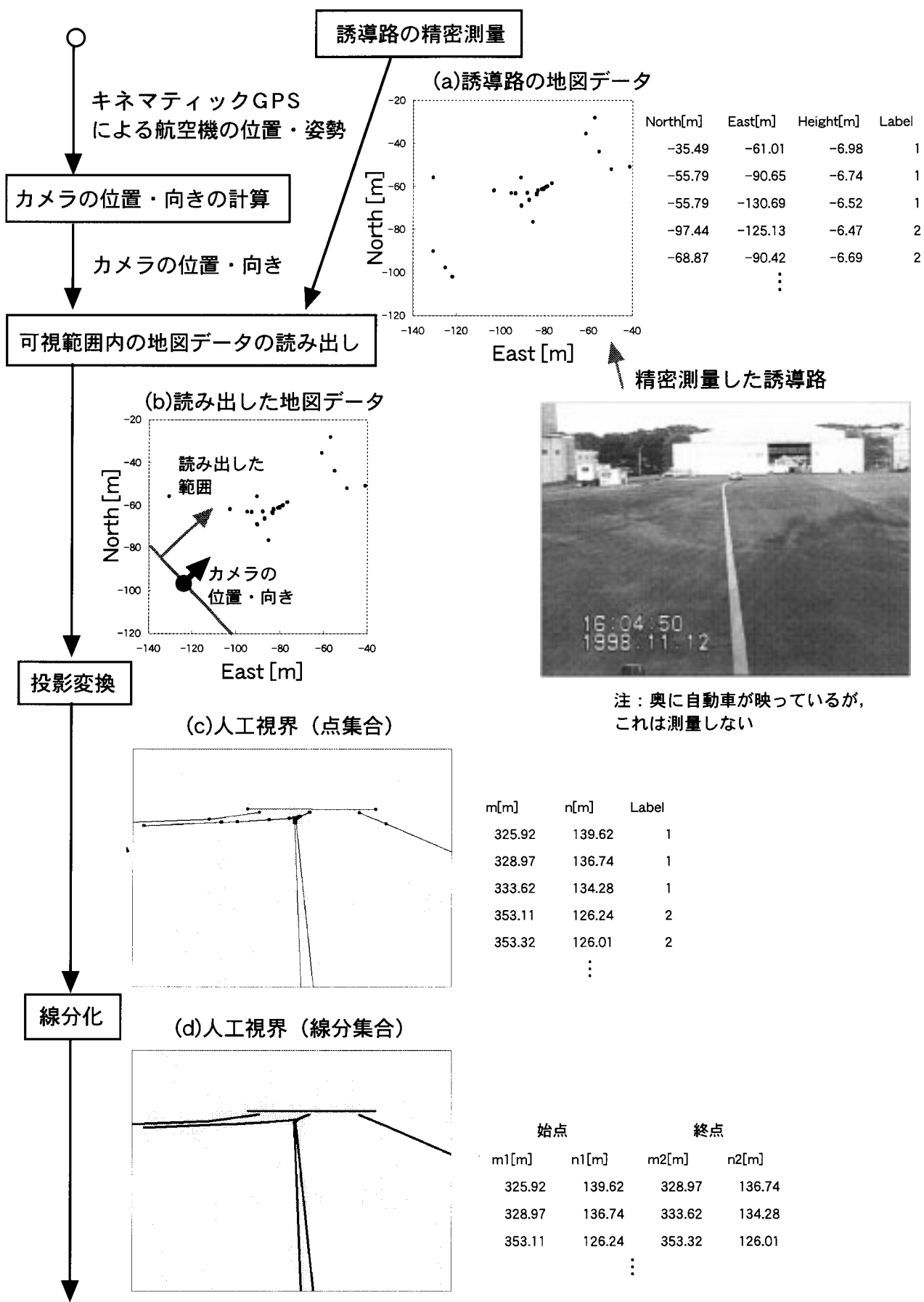


図3.13 人工視界の作成例

図 4 . 1 に画像処理のフローを示す．画像処理は，誘導路領域の抽出，階調画像への変換，エッジ抽出，線分集合抽出の順に行われる．

誘導路領域の抽出

誘導路領域の決定には，人工視界上の誘導路の位置を用いる．すなわち，図 3 . 13 (d) のような人工視界から誘導路の外形を取り出し，その外形に含まれるカメラ画像の部分を取り出す（例：図 4 . 2）．

階調画像への変換

エッジ抽出に必要な情報は画像の階調濃度であり，色が何色であるかは関係ない．ゆえに取り込む画像がカラー画像の場合，カラー画像から階調画像へ変換する．

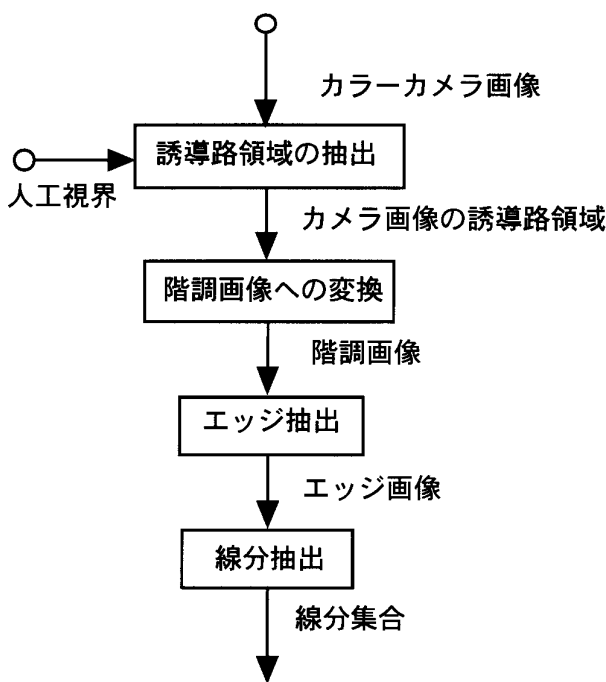
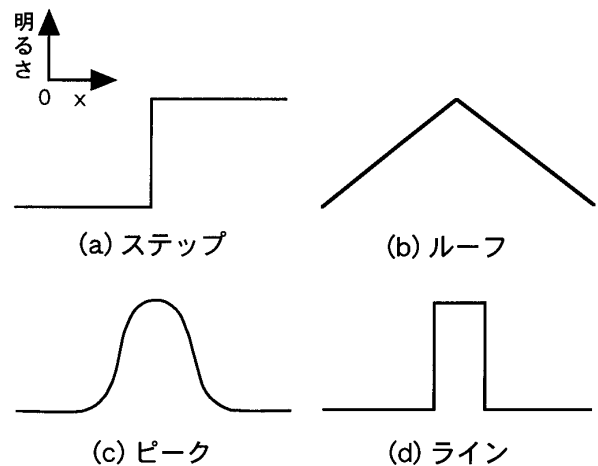


図 4 . 1 カメラ画像処理のフロー

エッジ抽出

階調画像から Sobel フィルタを用いてエッジを抽出する．Sobel フィルタについての説明は付録 B で示し，ここではエッジ抽出に Sobel フィルタを用いる理由を説明するにとどめる¹⁸⁾．

一般的にエッジのタイプは，ステップエッジ，ルーフエッジ，ピークエッジ，ラインエッジの 4 通りある．この中で誘導路と障害物との境界線として表れるのはステップエッジである（図 4 . 3）．従ってステップエッジ



(a) のステップエッジは遠くから照明されているときの積み木の稜線や，他の物体との境界である輪郭線などに対応している．(b) のルーフエッジは近くから照明されたときの稜線などに対応する．(c) のピークエッジのうち，負のピークエッジは 1 枚の面内の割れ目等に対応している．(d) のラインエッジはリモートセンシング画像における道路や橋などの細長い構造物に対応する．

図 4 . 3 エッジのタイプ

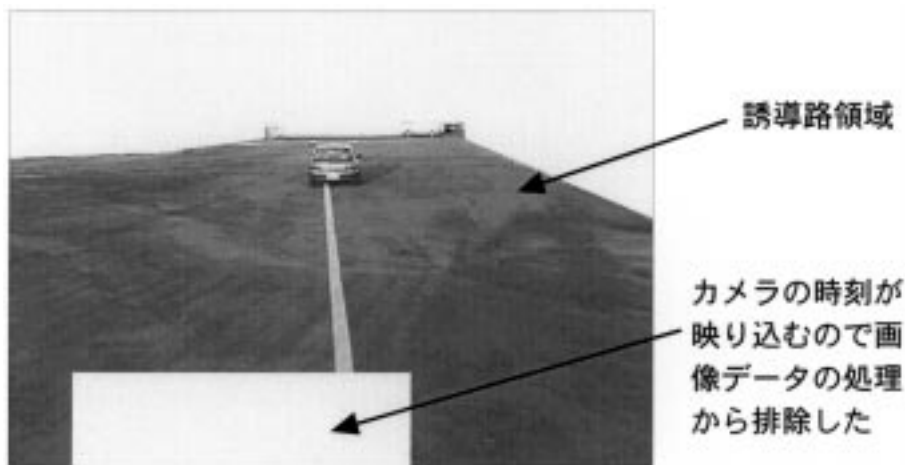


図 4 . 2 カメラ画像から抽出した誘導路領域

を抽出するのが適切である。

ステップエッジに有効なエッジ抽出の手法は一次差分フィルタである。ただし、単なる一次差分フィルタが有効であるのは雑音のない場合で、本システムのように景色画像を扱う場合は、雑音低減とエッジ検出の両方の機能をそなえた演算子が必要になる。このような雑音低減の機能を備え、かつ一次差分を行うフィルタがSobelフィルタである。

ところでSobelフィルタによって得られるエッジはまだ階調画像であり、線分抽出の前処理としては完全ではない。前処理として最後に適当な閾値を用いてエッジ画像を二値画像にした後、細線化しておく。

線分集合抽出

最後に線分集合を抽出する。画像から線分を抽出する方法は種々研究されているが、本システムでは輪郭線が連続している部分のみを線分として抽出したいため、輪郭線を追跡することによって許容誤差内に収まるように輪郭線を逐次的に区分して線分近似する Rammer の方法が有効である。この方法は計算量が少なくかつ精度良く計算することが可能である²⁰⁾。

< Rammer の切片線形近似 >

図4.4の開曲線を例に説明する。まず開曲線上の任意の点から直線 AB 上への距離 d を求める。この d の最大値

$$\max_{AB} d = d_c \tag{4.1}$$

を求め、その d_c を与える点 C が切片線形近似の頂点となるかどうか調べる。すなわち、あるしきい値 a を設定し、 $d_c > a$ のとき上図の開曲線 AB は二つの開曲線 AC, CB に分割され、そうでないときは分割は行われない。開曲線 AC, CB について同様の手続きを行うと、しだいに開曲線は細かく線形近似されていく。

以上の手順で線分集合を抽出した結果を、視点と終点

を一組とした線分データの集合として障害物抽出部に渡す。

4.2 カメラ画像処理の例

前節において述べた手順に従ってカメラ画像処理を行った例を図4.5に示す。はじめにaの原画像から人工視界を用いてbの誘導路領域を抽出する。(原画像には左下に時刻が入っていたので、ここでその部分も座標値を与えて削除した。)その後、誘導路領域画像からcのようなエッジを抽出し、最後に線分抽出によりdのような線分集合を得る。

5. キネマティック GPS とカメラ画像の複合化

本章では人工視界とカメラ画像から抽出した線分集合からどのように障害物を検知するかについて述べる。以後、カメラ画像から抽出した線分集合をカメラ画像線分集合と呼ぶ。

本研究の目的である障害物検知は、航空機の前方にある障害物を見つけ、航空機とその障害物との相対位置(航空機から障害物までの距離と方向)を知ることである。前方にある障害物を見つけることは、2章以降で述べてきたように、カメラ画像線分集合の中から人工視界を用いて誘導路に由来する線分を消去し、残った線分集合を障害物とするという方法で行う。そして残った線分集合から画像上での位置がわかれば、その位置を座標変換することによって障害物の局所固定水平面座標系上での位置がわかり、自機と障害物の相対位置を求めることができる。

しかし実際には、カメラ画像線分集合の中から人工視界を用いて誘導路に由来する線分を消去するだけでは正しく障害物を見つけることはできない。なぜならカメラ画像線分集合の中には障害物と地図データに含まれる誘導路に由来する線分の他に、線分抽出時に排除しきれなかった路面の凹凸などの不必要な線分が含まれているか

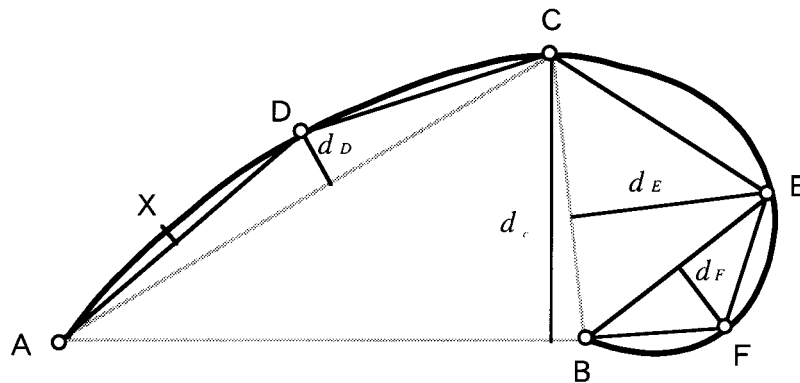


図4.4 Rammer の切片線形近似

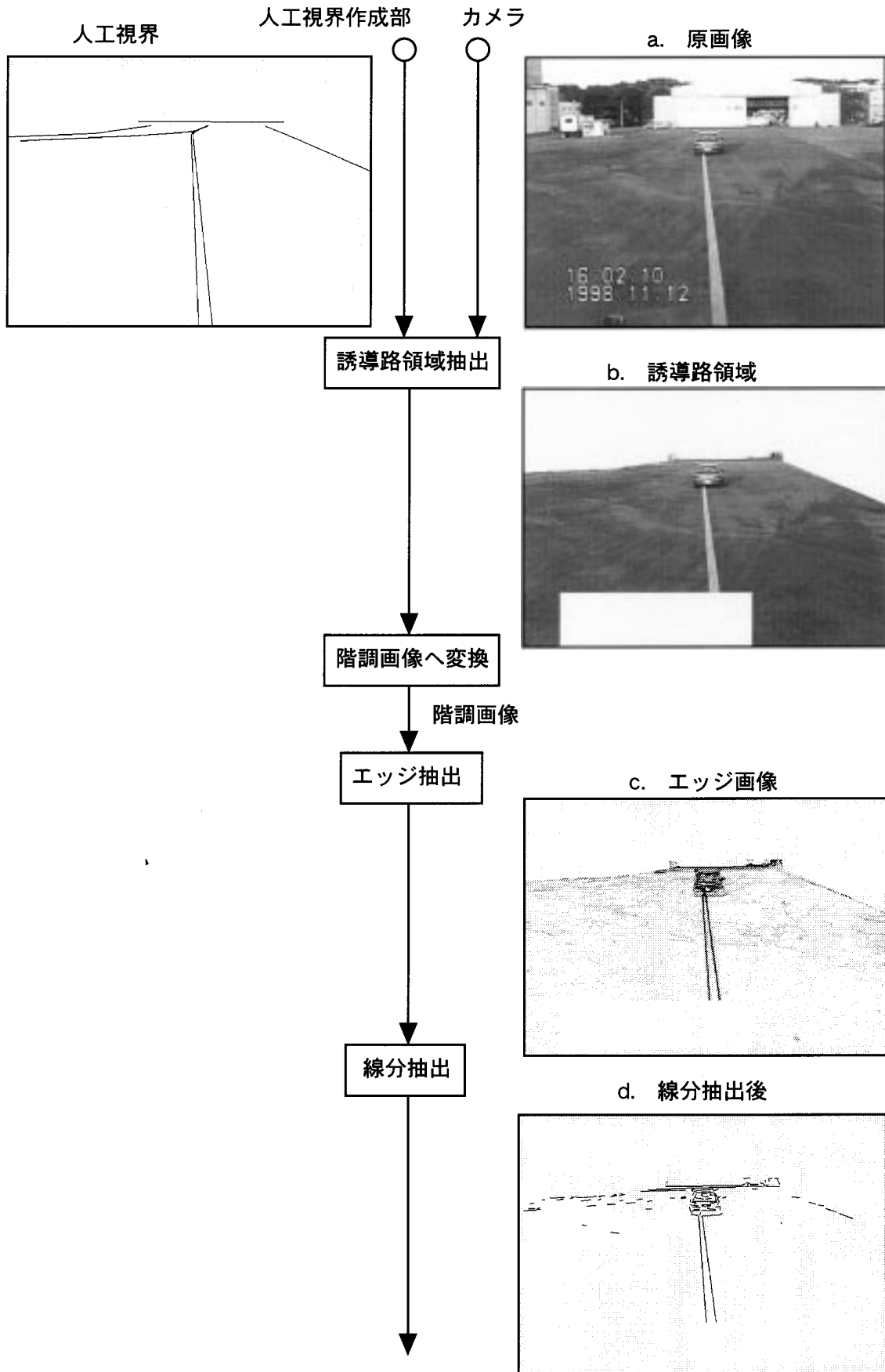


図 4 . 5 カメラ画像の処理例

らである．それらの不必要な線分も一緒に障害物とする
と，結果として誤検知のケースが増えたり相対位置誤差
が大きくなる可能性がある．そのためカメラ画像線分集
合の中から誘導路に由来する線分を消去したのちに，
残った線分の中から障害物に由来する線分を推定して取
り出すという手順を加える．障害物に由来する線分集合
が得られたら，それから画像上での障害物の位置を得る
ことができる．本研究で提案するアルゴリズムでは複数
の障害物を同時に検出することが可能である．

また，これまでは1組のキネマティック GPS データと
1枚のカメラ画像を用いた1エポック分の障害物検知手
順を述べてきたが，複数のエポックからなる連続データ
を扱う場合，エポックごとに検出される障害物の位置を
クラスタリングすることによって障害物の数と各障害物
の位置の時間変化を推定することができる．

以下では，人工視界とカメラ画像線分集合から障害物
を見つけ，画像上位置を求める方法とその例を5.1節，
5.2節で，障害物の画像位置から局所固定水平座標系
上での相対位置を求め，連続処理結果のクラスタリング
を行う方法を5.3節で述べる．

図5.1に人工視界とカメラ画像線分集合の入力を用
いた障害物検知のフローを示す．

5.1 障害物抽出

カメラ画像線分集合から人工視界を用いて誘導路に由
来する線分を消去する方法は，人工視界とカメラ画像線

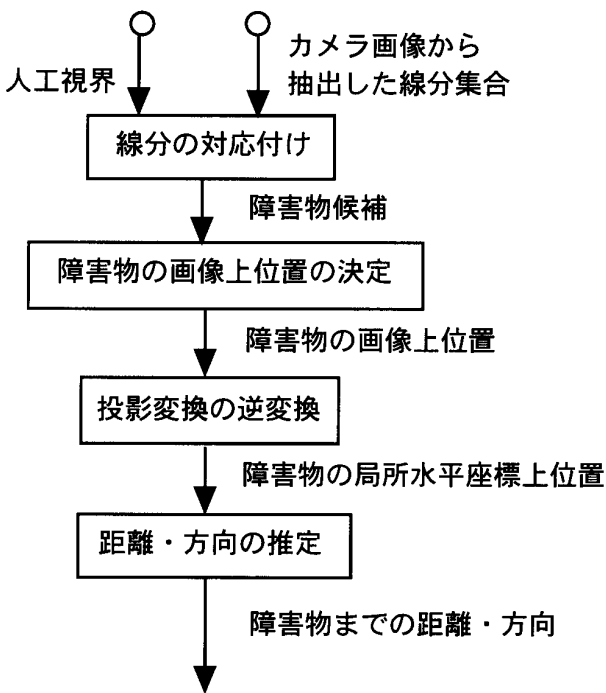


図5.1 障害物抽出のフロー

分集合を比較して対応をとることでカメラ画像から抽出
した各線分を意味付け，対応がとれた線分をカメラ画像
線分集合から消去するという手順をとる．ここで行う対
応付けを以下では線分マッチングと呼ぶ．本節ではこの
線分マッチングの手法，続いて対応がとれずに残った線
分集合から障害物を抽出する方法について述べる．

5.1.1 線分マッチングアルゴリズム

線分相互のマッチングを行う手法は，弛緩法を用いた
方法やクラスタリングを用いた方法など種々研究されて
いるが，本システムのマッチングの基本的な考え方は，人
工視界をテンプレートとしたテンプレートマッチングで
ある．テンプレートマッチングは一般的に画像そのもの
をテンプレートとすることが多いが，本研究の場合，人
工視界の線分集合をテンプレートとする．キネマティ
ックGPSにより人工視界はカメラ画像線分集合中の誘導路
と形状も位置も非常に近接しているため，テンプレート
である人工視界をカメラ画像線分集合の上で少し移動さ
せる（これをテンプレートの移動と呼ぶ）だけで，カメ
ラ画像線分集合中の誘導路と一致させることができる．
そして重なった線分をカメラ画像線分集合から消去す
ると障害物候補が得られる．

テンプレートの移動量の決定と線分の対応付けの判定
に使用する情報は線分間の角度 (w_{ik}) と距離 (l_{ik}) であ
る (図5.2)．ただし角度は $\pi/2$ 以下で表し，距離は
カメラ画像から抽出した線分の midpoint と人工視界中の線分
の間の最短距離を用いる．この角度と距離を用いて線分
相互の近似度を表すコスト関数を決め，そのコストの大
きさによってテンプレートの移動量の決定と線分の対応
付けの判定を行う．

線分マッチングは以上のように線分の角度と距離を利用
したテンプレートマッチングで行うが，カメラ画像線
分集合の全てをテンプレートの移動量の計算に使用す
ると，人工視界に含まれない障害物に由来する線分の影
響を受け，人工視界を正しい位置に合わせられない．そこ

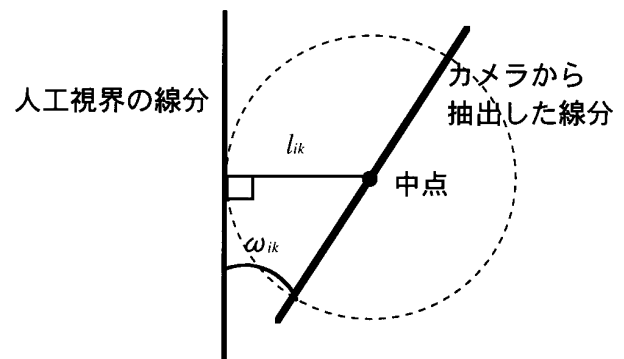


図5.2 線分間の距離と角度

で本手法ではマッチングに使用するカメラ画像線分から障害物に由来すると予想される線分を排除している。また、カメラ画像線分集合中の誘導路に由来する線分は長い直線となって現れることが多いので、誘導路の特性をマッチングに反映させるために、カメラ画像線分の長さも重みとして判定に使用する。

線分マッチング手順を詳しく述べると、人工視界中の全線分にラベルを付け、次にカメラ画像線分集合から人工視界の位置合わせに用いる線分を選び仮のラベルを付け、その仮ラベルに基づいて人工視界全体の位置合わせを行い、対応のとれた線分を排除して障害物候補の線分を抽出する。ここで手順がテンプレートの人工視界を動かす部分である。以下これらの手順を順次説明する。

人工視界中の全線分にラベルを付ける

人工視界中の各線分に対し1から順に番号を付け、これを人工視界の各線分に対するラベル l_k とする。番号をつける順番は任意だが、同じ番号を2本以上の線分につけてはならない。人工視界中の線分の本数を N とすると、ラベルの総数も N である。

カメラ画像線分集合から人工視界の位置合わせに用いる線分を選び、仮のラベルを付ける

カメラ画像から抽出した全線分 i に対して全ラベル l_k のコスト $C(i, l_k)$ を計算し、 $C(i, l_k)$ ($k = 1, \dots, N$)が最小となる l_k を線分 i の仮のラベル l_i とする。ただし、コスト $C(i, l_k)$ は次式によって定義する。

$$C(i, l_k) = \frac{w_{ik}}{w_T} + \frac{l_{ik}}{l_T} \quad (5.1)$$

ここで、 w_{ik} はカメラ画像から抽出した線分 i と人工視界中の線分 k の間の角度 [$\text{rad} (0 < \theta < \pi/2)$]、 l_{ik} はカメラ画像から抽出した線分 i の midpoint と人工視界中の線分 k の間の最短距離 [m]、 w_T 、 l_T はそれぞれ w_{ik} 、 l_{ik} を無次元化するためのパラメータである。このとき線分 i に対するラベル l_i のコスト $C(i, l_i)$ があるしきい値を上回るならば、 l_i はNULLとし、この線分 i を障害物候補の線分集合に加え、次の手順 人工視界の位置合わせに使用しない。

仮ラベル l_i に基づいて人工視界全体の位置合わせを行う

人工視界を下記の a. ~ c. の順に移動しながら、各線分 i に対する仮ラベル l_i のコスト $C(i, l_i)$ を求め、 $C(i, l_i)$ が最小となる人工視界の位置を探す。コスト $C(i, l_i)$ は以下により与える。

$$C(i, l_i) = w_i \cdot C(i, l_i), \quad w_i = d_i \quad (5.2)$$

ここで、 w_i はカメラ画像線分の長さに関する重み、 d_i はカメラ画像線分 i の長さである。

a. 横方向平行移動

$$\begin{bmatrix} m_v \\ n_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m + m_s \\ n \end{bmatrix}, \quad -M_T \leq m_s \leq M_T \quad (5.3)$$

b. 縦方向平行移動

$$\begin{bmatrix} m_v \\ n_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \\ n + n_s \end{bmatrix}, \quad -N_T \leq n_s \leq N_T \quad (5.4)$$

c. 画像中心に関して回転

$$\begin{bmatrix} m_v \\ n_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos R_m & \sin R_m \\ -\sin R_m & \cos R_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m - m_c \\ n - n_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_c \\ n_c \end{bmatrix}, \quad -R_T \leq R_m \leq R_T \quad (5.5)$$

ここで、 (m, n) は人工視界線分の端点位置座標、 (m_v, n_v) は移動または回転後の人工視界線分の端点位置座標、 (m_c, n_c) はカメラ画像の中心点の座標であり、 m_s, n_s はそれぞれ横方向、縦方向の平行移動量、 R_m は回転させる角度である。また M_T, N_T, R_T はそれぞれ m_s, n_s, R_m の変化範囲を表すしきい値である。

対応のとれた線分を排除して障害物候補の線分を抽出する

では全体的な位置調整を行ったが、では個々の線分相互が対応しているかどうかを調べる。すなわち、各線分 i に対し全ラベル l_k それぞれについてのコスト $C(i, l_k)$ ($k = 1, \dots, N$)を求め、そのうち最小となるコストがしきい値未満であればその線分 i は人工視界中の線分 l_k と対応がとれたと判定し、しきい値以上ならばその線分 i を障害物候補の線分集合に加える。

5.1.2 障害物の画像上での位置決定

マッチング後の障害物候補には障害物に由来する線分と対応の取りきれなかった誘導路に由来する線分、それ以外の路面に関する線分が含まれている。この中の障害物以外に由来する線分は、画像処理 (Sobelフィルタのしきい値を路面の凹凸を抽出しないよう調整にした) と線分マッチング (誘導路に由来する線分をほぼ排除できるようにテンプレートマッチングにおけるコスト関数のパラメータ値としきい値を調整した) の結果、1本2本とまばらに残っている程度である。一方、障害物に由来する線分はほぼはじめにカメラ画像から抽出した本数が残っているので、障害物候補の線分集合の中である程度の本数が集まっている部分が障害物のある部分であると

判定できる。

ゆえに、本手法では線分の固まりを判定するために適当な大きさの枠をつくり、その中に入る線分の本数を数え、その本数がしきい値以上であれば障害物があるとした(図5.3)。障害物は遠くにあれば小さく、近くにあれば大きくカメラ画像に映るので、判定に用いる枠も遠くが映っている所ほど小さな枠を、近くが映っている所ほど大きな枠を用いた。本手法では2つ以上の障害物を同時に抽出することも可能である。

具体的な手順は以下の通りである。

障害物候補の線分集合を中点位置の点集合に変換する。

縦軸方向にある幅の帯を少しずつずらしながら、帯に入る中点の数を数える(図5.4)。

このとき、帯の幅を画面位置で上に行くほど狭く、下に行くほど広くとる。こうすることで、画面で遠くにあるほど狭い、近くにあるほど広い範囲で線分を数えることになる。帯の幅の大きさ W は、簡単のため次式のように画像上での n 軸方向の高さ H に従って線形変化させることとする(画像の原点は左上)。

$$W = \frac{(W_{\max} - W_{\min})}{(H_{\max} - H_{\min})}(H - H_{\min}) + W_{\min} \quad (5.6)$$

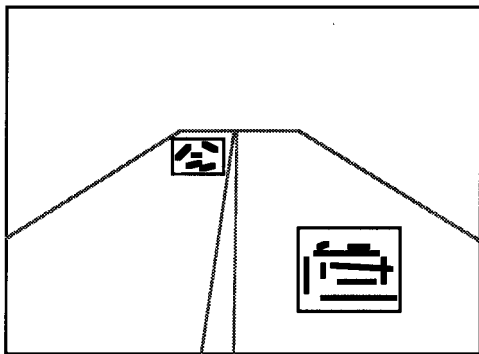


図5.3 障害物の画像上位置の推定

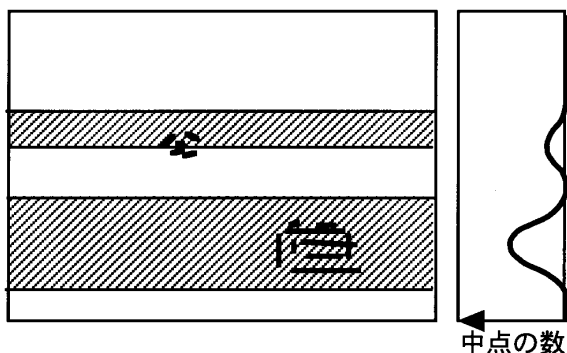


図5.4 縦軸方向での線分数のカウント

ここで、 H_{\min}, H_{\max} はそれぞれ人工視界データの n 座標値の最小値と最大値である。また W_{\min}, W_{\max} はそれぞれ帯の幅の大きさの最小値と最大値で、その値は経験的に決める。

において中点の数があるしきい値以上になった帯の中でのみ、横軸方向に と同じ方法で中点の本数を数える(図5.5)。

ここでも、 と同様に帯の幅を画面位置で上に行くほど狭く、下に行くほど広くとる。

において中点の本数があるしきい値以上になった部分を障害物がある部分とする(図5.6)。

ここで中点の本数があるしきい値以上になる部分がなければ、障害物はないとして以下の全手順は行わない。

で得た障害物がある部分について、次のa.~c.の手順で、障害物に由来する線分とその障害物の画像上での位置を推定する。

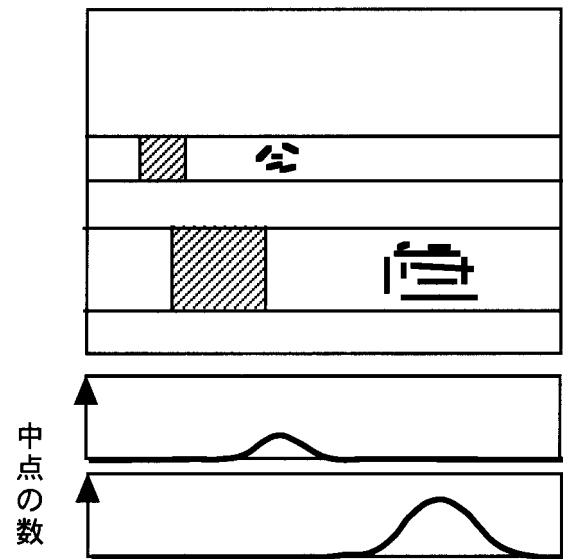


図5.5 横軸方向での線分数のカウント

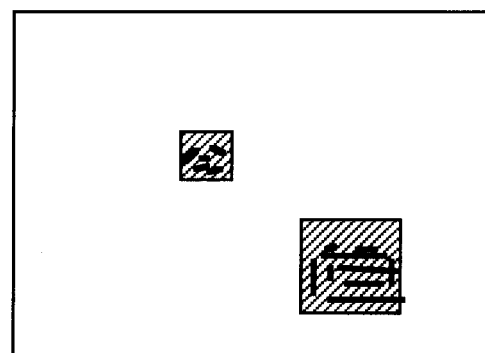


図5.6 障害物がある部分(斜線部分)

- a. 得た障害物がある部分の中心から障害物候補の全線分の中点までの距離を計算する(図5.7).
- b. 各距離を大きさの順に並べ、距離の小さい順に1つ後の距離との差を調べていき、差があるしきい値以下であればその線分を障害物の集合に加える. 差がしきい値以上の場合はその時点でその部分についての手順bを終了

する(図5.8).

- c. 得られた障害物の線分集合の端点の m, n 座標値の最大値・最小値から外接長方形を求め、その外接長方形の底辺の中点を障害物の画面上での位置とする(図5.9).

以上の手順によって、障害物の画像上での位置が得ら

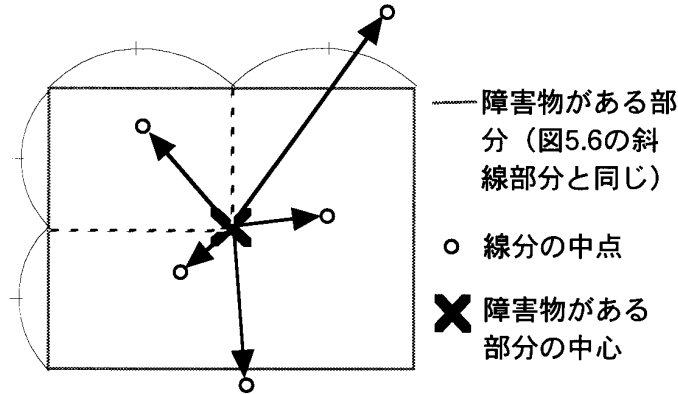


図5.7 中点までの距離

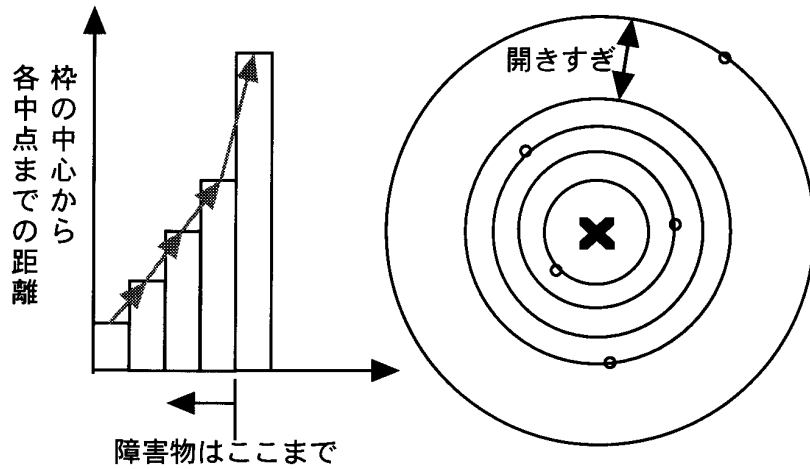


図5.8 障害物の線分集合の選別

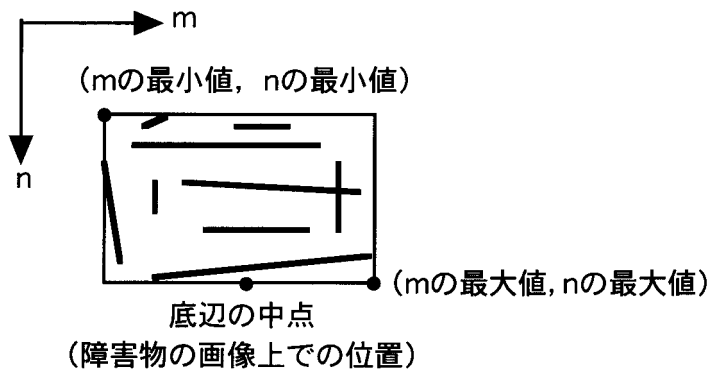


図5.9 障害物の画像上での位置

れる .

5 . 2 障害物抽出の例

図 5 . 10 に上述のアルゴリズムに従って障害物抽出を

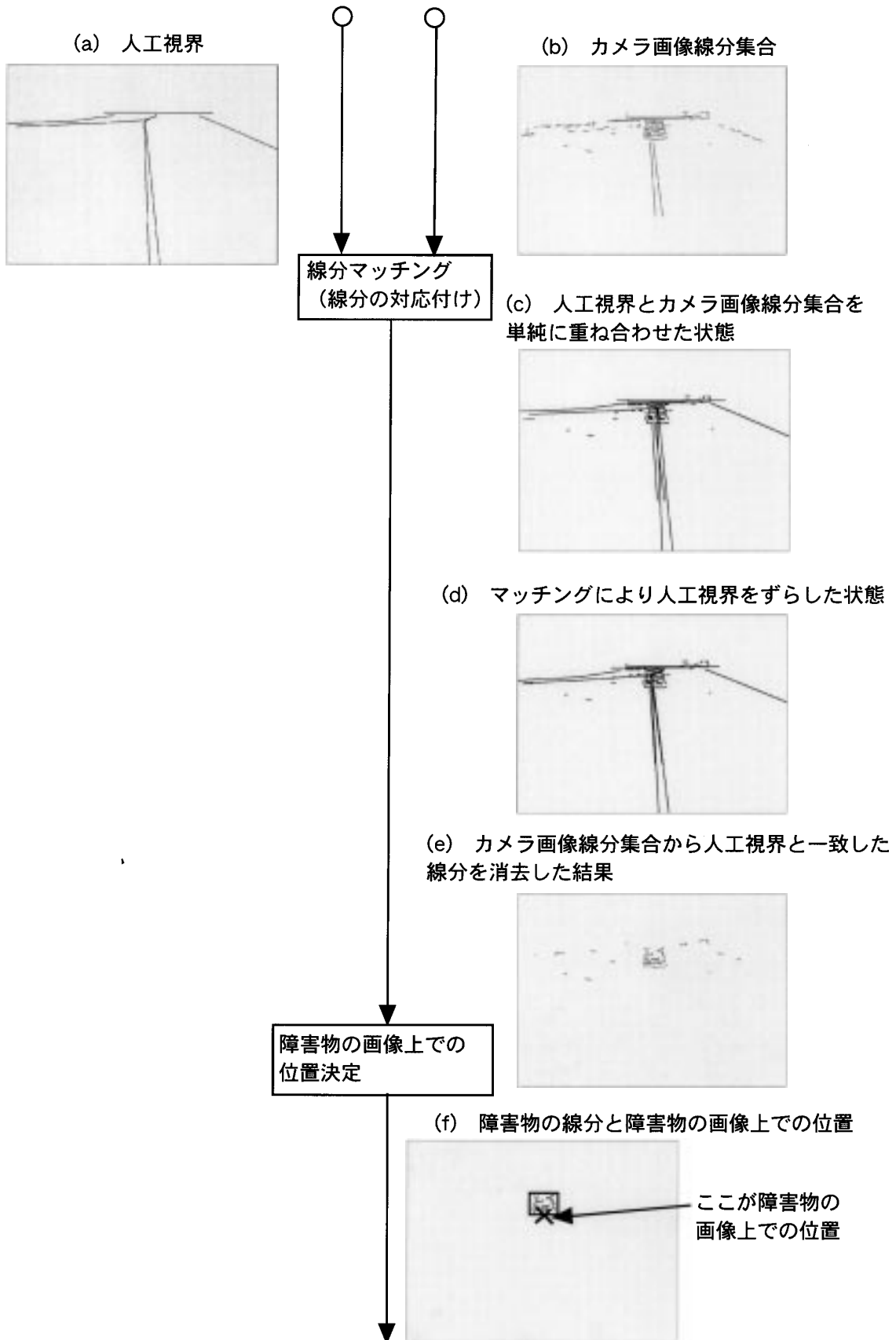


図 5 . 10 障害物抽出の例

行った結果の例を示す．同図 (a) の人工視界と (b) のカメラ画像から抽出した線分集合を単純に重ね合わせると同図 (c) のようになる．キネマティック GPS の精度がよいのでほぼ位置はあっているが、まだ少しずれている．その位置を線分マッチングによって人工視界の位置をカメラ画像線分集合中の誘導路に合わせてずらすと、同図 (d) のようになる．そしてカメラ画像線分集合から人工視界と一致した線分を消去すると同図 (e) のようになり、これが障害物の候補である．障害物候補の線分集合から障害物を抽出してその画像上位置を決定すると同図 (f) のようになる．

5.3 障害物位置推定アルゴリズム

本節では障害物の画像上位置から自機と障害物の相対位置（障害物までの距離と方向）を推定する手法と、連続データを処理する場合に障害物の数と位置の推移を得る手法について述べる．

5.3.1 自機と障害物の相対位置推定

自機と障害物の相対位置関係は、障害物の位置を自機と同じ局所固定水平面座標系に変換すれば、容易に求めることができる．障害物の局所固定水平面座標系上での位置を推定する方法は人工視界作成に用いた投影変換（3.1節）の逆変換である．すなわち、人工視界を作成した時の変換の逆変換により、カメラ画像上の位置 (m, n) を地面に固定した XYZ 座標系上の位置 (x, y, z) に変換する．

この逆変換を行う際に問題となることは、カメラ画像座標すなわち MN 座標は XYZ 座標に比べて次元が一つ少ないということである．MN 座標系上の位置からだけでは、方向余弦（視線）ベクトル上のどこに障害物が存在するのかわからない．したがって、XYZ 座標上の仮の z 座標値を用いて逆変換を可能にする．

また、図 5.10(c) のようにマッチング前の人工視界とカメラ画像の位置は完全には一致しておらず、人工視界の位置は誤差を含んでいる．したがってそのまま逆変換を行うと、マッチング前の人工視界の誤差が障害物位置の推定結果の誤差として現れるので、逆変換をおこなう前にカメラ画像上での位置をマッチングで人工視界をずらした量だけずらし、逆変換による誤差を軽減させる．

いま仮の z 座標値を z'' とすると XYZ 座標上での障害物の位置 (x, y, z) は

$$z' = \frac{z'' - z_0}{\cos b - n' \sin b / f} \quad (5.7)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = -\frac{z'}{f} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \cos(R_m) & -\sin(R_m) \\ \sin(R_m) & \cos(R_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m - m_c \\ n - n_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_s \\ n_s \end{bmatrix} \right\} \quad (5.8)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a & -\sin a \cos b & \sin a \sin b \\ \sin a & \cos a \cos b & -\cos a \sin b \\ 0 & \sin b & \cos b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

ここで、 (m, n) は MN 座標系上での障害物の位置、 (m', n') は M'N' 座標系上での障害物の位置、 (x_0, y_0, z_0) は XYZ 座標上でのカメラの位置、 f はカメラの焦点距離、 a, b は投影変換を行った際の座標の回転角、 m_s, n_s はそれぞれマッチングで人工視界を m 方向、 n 方向にずらした量、 R_m はマッチングで人工視界を回転させた角度である．焦点距離 f はカメラ固有のものであり、計算のたびに変わることはない． a, b の値はカメラの視線ベクトル（方向余弦）に依存するので、投影変換を行った時に求めた値をそのまま用いる． (m_c, n_c) はカメラ画像の中心点の座標である．

次に上式で用いた仮の z 座標、 z'' をどのように与えるかについて述べる．この z'' の値は正確に与えないと逆変換の結果は大きく異なる．図 3.13(d) に示した人工視界を逆変換した結果を図 5.11 に示す． a は z'' をカメラの位置から一番遠い地図データの高度にした場合、 b は z'' をカメラの位置から一番近い地図データの高度にした場合、 c は z'' をカメラ画像の中心に映っている地表面位置に最も近い地図データの（すなわち a, b, c のなかで一番正解に近いであろう）高度にした場合である．また d は元となった地図データである．この図で北方向のずれを見るとわかるように明らかに c の変換結果が元となった地図データに近く、より正確に逆変換できていることがわかる．

したがって、本システムでは以下のように 2 回繰り返して逆変換を行う．

z'' に地図データの平均高度を代入し、逆変換を行う．

逆変換結果の (x, y) に最も近い地図データの高度を z'' に代入し、再度逆変換を行う．

以上で障害物の局所固定水平面座標系での位置が得られた．この位置とキネマティック GPS による自機の位置（カメラの位置）から幾何学的に自機から障害物までの距離と方向を求めることができる（図 5.12）．

5.3.2 連続処理における障害物の追尾

これまでは 1 組のキネマティック GPS データと 1 枚のカメラ画像を用いた 1 エポック分の障害物検知手順を述

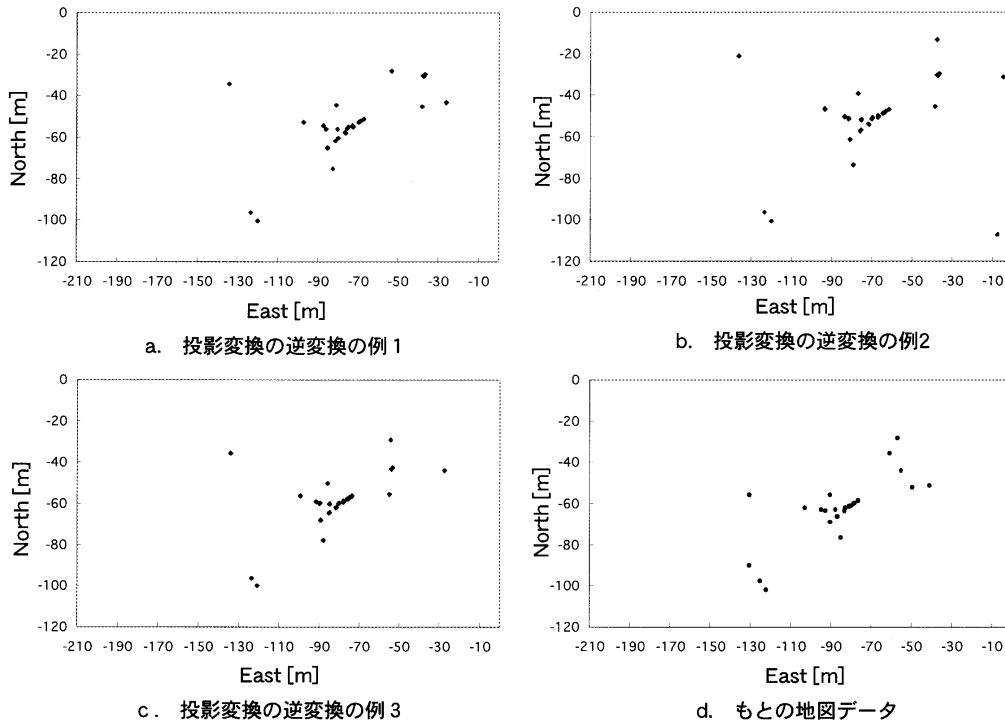


図 5 . 11 投影変換の逆変換の例

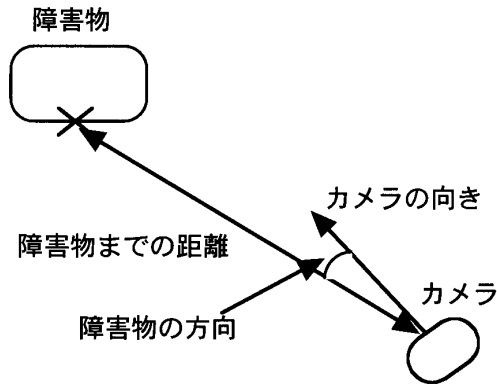


図 5 . 12 障害物までの距離と方向

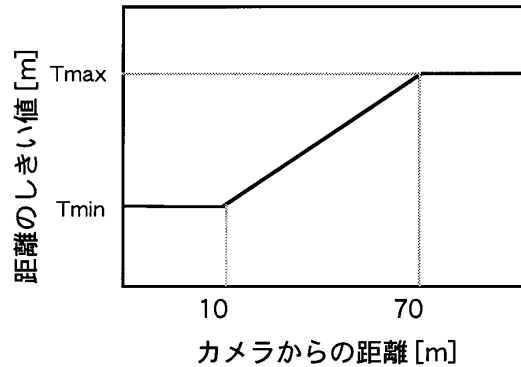


図 5 . 13 距離のしきい値の変化

べてきたが、本節では複数のエポックからなる連続データを扱う場合にエポックごとに検出される障害物の位置を分類することによって障害物の数とそれぞれの位置の推移を推定する方法を述べる。

本システムでは複数の障害物を検出することが可能であるが、複数検出された場合の障害物の出力の順番は定まっておらず、そのままでは現エポックの出力障害物が以前のエポックのどの障害物と同一であるかがわからないゆえに以下のようにクラスタリングを行うことで障害物の追尾を行う。

本手法は、現在のエポックで検出した障害物の位置と以前のエポックの障害物の位置との水平距離を求め、その距離があるしきい値以下であれば同一の障害物である

とし、同一の障害物がなければ、新しく発見した障害物とするものである。

ルールをまとめて書くと以下ようになる。

現在のエポックで検出した障害物の位置と以前のエポックの障害物の位置との水平距離を求め、その距離があるしきい値以下であれば同一の障害物であるとする。

以前のエポックに同一の障害物がなければ、新しく発見した障害物とする。

同一エポックで検出された複数の障害物を同一の障害物とみなさない。

障害物間の距離のしきい値はカメラからの距離に従って図 5 . 13 に示すように変化させる。検出される障害物の位置誤差は、カメラからの距離が遠くなるに

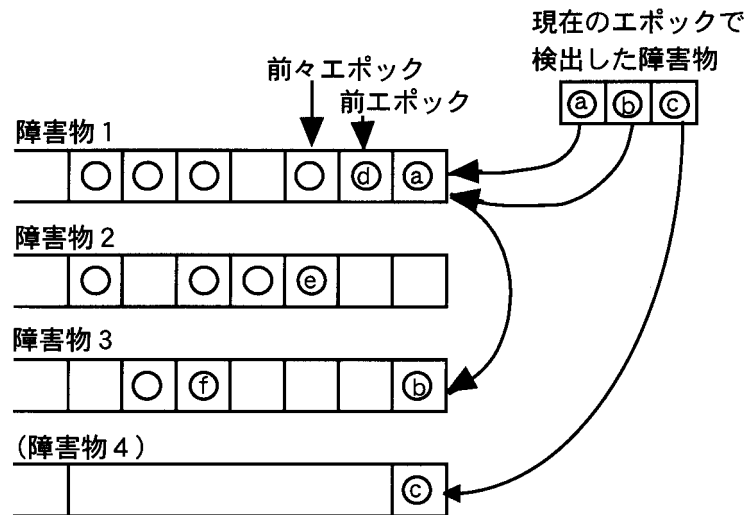


図 5 . 14 障害物のクラスタリング

したがって増大する．ゆえに遠くの障害物は位置変動が大きくても同一である可能性があるので，遠くほど大きく，近いほど小さいしきい値で判定する．

以前の障害物があるしきい値以上のエポック数が空白である場合は，距離比較の対象としない．すなわち，あるしきい値以上のエポック数空白である障害物は視界から消えたとする．

図 5 . 14 の例に従って説明する．現在のエポックで a , b , c 3 つの障害物を検出したとする．それ以前に見つけた障害物は障害物 1 , 障害物 2 , 障害物 3 の 3 つあり，これらの障害物に一番最後に登録された障害物の位置と現エポックの障害物位置を現在のエポックで検出した障害物と比較する．まず障害物 a は，障害物 1 の d との距離が一番小さく，しきい値条件を満たすため，障害物 1 と同一であるとして最後尾に加える．障害物 b は a と同様に障害物 1 の d との距離が一番小さく，しきい値条件を満たすが，先に a が入っており，かつ a の方が d との距離が小さいため，次に条件を満たす障害物 3 の最後尾に加える（ここで a より b の方が d との距離が小さい場合は，障害物 1 には b が入り，a は別に適合する障害物を探す）．障害物 c は条件に合う障害物が以前にないので，新しい障害物 4 とする．

6 . 障害物検知アルゴリズムの実証実験とその評価

航空宇宙技術研究所調布分室内の誘導路において，本障害物検知システムのアルゴリズム実証実験を行った．航空機の代用として自動車(トヨタ・ランドクルーザ)を使用し，3 台の GPS 受信機を搭載して位置と姿勢を計測した．障害物は空港内で動く可能性のある自動車と人間の 2 種類とした．誘導路は通常，直線コースとカーブコースからなっているので，その両方を想定した 2 種類の

コースでデータ収集した．実験はデータ取得とデータ解析の 2 段階に分け，カメラ画像と GPS による位置・姿勢データを取得記録し，次いでオフライン解析により障害物検知を試みた．

また誘導路での実験に際し，人工視界作成のために必要な誘導路の地図データをアルゴリズム実証実験に先駆けてキネマティック GPS 精密測量により作成した．

6 . 1 誘導路地図データの作成

測量した誘導路は航空宇宙技術研究所調布分室内の全長 100 m 程度の誘導路である(図 3 . 6 a)．図 3 . 6 a の写真の反対側には一般道を挟んで調布飛行場があり，この誘導路はその飛行場を離着陸する航空宇宙技術研究所の実験用航空機を写真正面の格納庫に格納するための誘導路である．測量は誘導路の両端の線とセンターラインについて行った．センターラインはもともと 1 本しかないが，カーブでの実験を行うためにビニールテープ(幅 5 cm を並列に並べた)でカーブ部分を付加し二線にした．

キネマティック GPS 測量の結果は一筋の連続データであるが，その中から特徴点の座標を抜き出し，地図データとした．得られた地図データは図 3 . 12 に例として既出した．

6 . 2 実験システムの構成

<データ取得におけるシステム構成>

データ取得におけるシステム構成の概要を図 6 . 1 に示す．自機であるランドクルーザは位置・姿勢の取得のために 3 つの GPS 受信機を使用した．カメラは連続処理をすることを想定し，家庭用ビデオカメラを使用した．また障害物の検出結果と比較する真値を得るために，障害

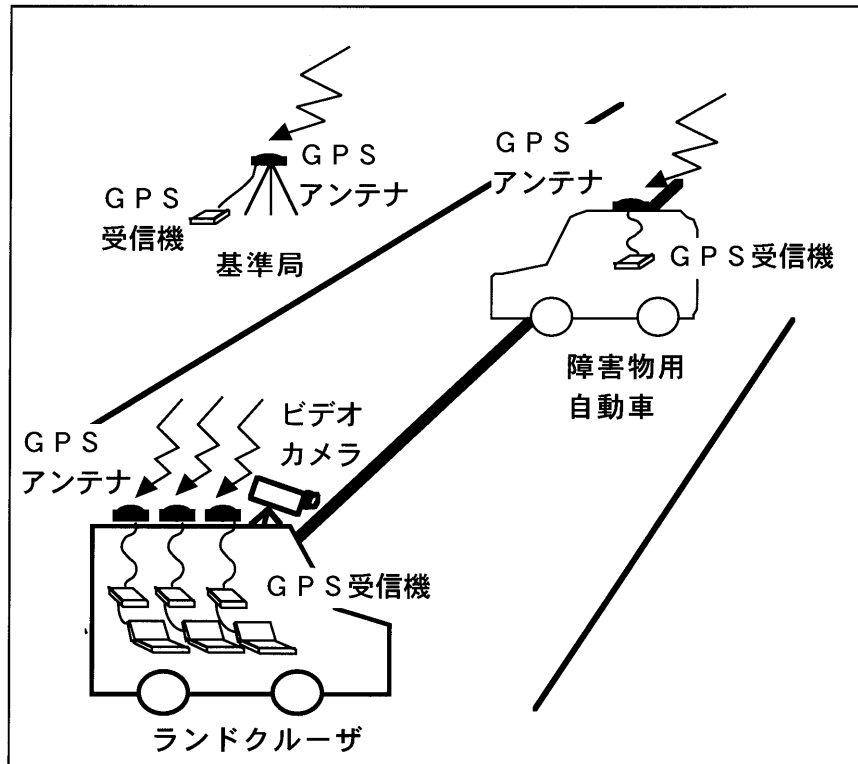


図 6 . 1 データ取得におけるシステム構成

物の位置もキネマティックGPSで測位した(人間の場合は手にアンテナと受信機を持ち測位した)。またキネマティックGPSは相対測位であるから、基準局を別に設置した。この基準局は航空宇宙技術研究所調布分室の飛行システム棟屋上に設置した。

データの取得に使用した機材を以下に示す。

- ・トヨタ・ランドクルーザ 1台
- ・普通自動車 1台
- ・ビデオカメラ 1台
- ・GPS アンテナ 5台
- ・GPS 受信機 5台 (Trimble 4000SSi 2台, Ashtech G12 2台, NovAtel 3151R 1台)
- ・データ記録用ノート型PC 3台
- ・ケーブル(アンテナ接続用5本, ノートPC接続用3本)

ランドクルーザの他にもう一台の普通自動車を障害物として使用した。ビデオカメラはランドクルーザに設置し前方を映すために用いた。アンテナと受信機は5組使用したが、このうち3組はランドクルーザの位置・姿勢推定, 1組は実験結果と比較するための障害物位置の真値推定, あとの1組は基準局に用いた。ノート型PCはAshtech G12とNovAtel 3451R受信機で得たGPSデータの記録用である。Trimble 4000SSiは受信機本体にGPSデータを保存できるので記録用PCは必要ない。ビデオカメラの映像はテープに保存した。

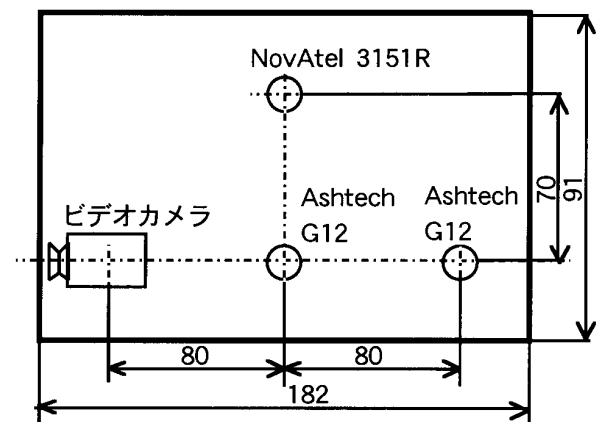


図 6 . 2 GPS アンテナとビデオカメラの配置
(寸法の単位は [cm])

ランドクルーザには図 6 . 2 に示すように、ベニヤ板の上にビデオカメラと3組のアンテナを載せた。ビデオカメラを板の左前方に、アンテナ1, 2をビデオカメラの後方の直線上に、アンテナ3をアンテナ1の真横に配した。それぞれの間隔は図 6 . 2 に示した通りである。アンテナ1, 2は方向余弦(仰角, 方位角に相当)を求めるため、アンテナ3は視線ベクトル回りの回転角を求めるために用いた。アンテナ用のケーブルはアンテナ設置位置に開けた穴を通し、ランドクルーザ車内の受信機に接続した。以上の機材を載せたランドクルーザの写真を

図 6. 3 に示す．以後このランドクルーザをカメラ車両と呼ぶ．

<データ解析のシステム構成>

取得したデータは図 6. 4 に示すシステムで解析した．GPS データは Trimble 4000SSi 受信機については RS232C ケーブルで受信機から直接，Ashtech G12 と NovAtel 3151R 受信機についてはフロッピーディスクを経由して解析用 PC に取り込んだ．ビデオの画像取り込みは Data Translation 社製の画像ボード DT3153 (NTSC カラーカメラ対応 24 ビットカラー画像入力ボード) を経由して行った．取り込んだデータは C 言語で作成したオリジナルなプログラムを用いて解析用 PC にて解析した．ただし，入力されたカメラ画像から線分を抽出する手順に限り，市販の汎用画像処理ソフト (HALCON, MVTec 社製) を利用した (このソフトは C 言語用のライブラリを用意しているので，障害物検知プログラムの中ではカメラ画像の線分抽出に必要なオペレータを関数として呼び出した．)

使用した PC は DEC Celebris GL-2 (CPU は Pentium 266 MHz) である．

6. 3 実験シナリオと評価方法

6. 3. 1 実験シナリオ

<データ取得>

障害物検知の連続処理を行うために，データ取得時間中は GPS 受信機，ビデオカメラともにほぼ中断無く連続稼働させた．ここで GPS 受信機のデータレートは 2 Hz とした．

実験パターンは，実際に誘導路で起こるかもしれない状況を模擬した障害物の種類，障害物までの距離の変化方法，撮影方向を変えた合計 6 パターンとした．障害物の種類は自動車と人間の 2 種類とした．障害物までの距

離は自分から近づく，および障害物が遠ざかるの 2 種類とした．自分から近づく場合は作成される人工視界が各



(a) 機材を載せたランドクルーザ



(b) 上から見た様子

図 6. 3 機材を載せたランドクルーザ

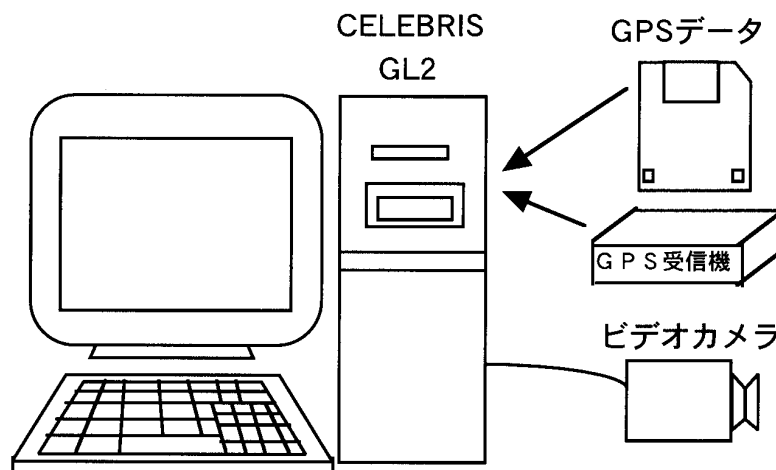


図 6. 4 データ解析におけるシステム構成

エポックごとに全く異なる様子になるので、人工視界が連続的に正しく誘導路を再現できているか調べるという意味もある。また、撮影方向は直線路を模擬した誘導路の格納庫方向とカーブ部を模擬した一般道方向の2方向で実験した。

これらの条件を変化させた6つの実験パターンのうち、撮影方向が格納庫方向（直線コース）である3パターンを図6.5に示す。撮影方向が逆のパターンはこの図において撮影方向と移動方向が逆となる（カメラ車両が移動する場合は大きくカーブするセンターラインに沿って移動する）。図中の矢印はカメラ車両、障害物の移動する方向を表す（静止している場合は矢印はない）。

パターン1では、カメラ車両は静止状態でデータを取り、自動車を徐々に遠ざけた。障害物は自動車のみである。パターン2では、障害物である自動車が静止している状態で、データを取りながらカメラ車両を障害物に近づけた。障害物は自動車のみである。パターン3は障害物を自動車と人間の2つとし、自動車の方は静止し、人間が遠くから歩いてくる様子を、静止したカメラ車両か

ら撮影した。

<データ解析>

取得したデータは前述のPCにおいて後処理をした。プログラムの入力には4つの受信機におけるキネマティックGPS測位結果（時系列リスト）ファイルとカメラ画像と誘導路の地図データである。誘導路の地図データは作成済みであり、カメラ画像はビデオカメラから画像ボードを経由してプログラム作動時に直接読み込むのでプログラム実行前の特別な処置は行わなかった。キネマティックGPS測位結果のファイルは、受信機から取り込んだGPSデータを用いてキネマティックGPS測位を行い、その座標値を局所固定水平面座標系に変換してから使用した。ただし、キネマティックGPS測位と局所固定水平面座標系への変換は市販汎用ソフト（GPSurvey, Trimble社製）を利用した。

データ解析は2秒間隔の連続処理を6つの実験パターンそれぞれについて行った。2秒という計算周期は、1組のデータを処理する最大計算時間が2秒以下であった

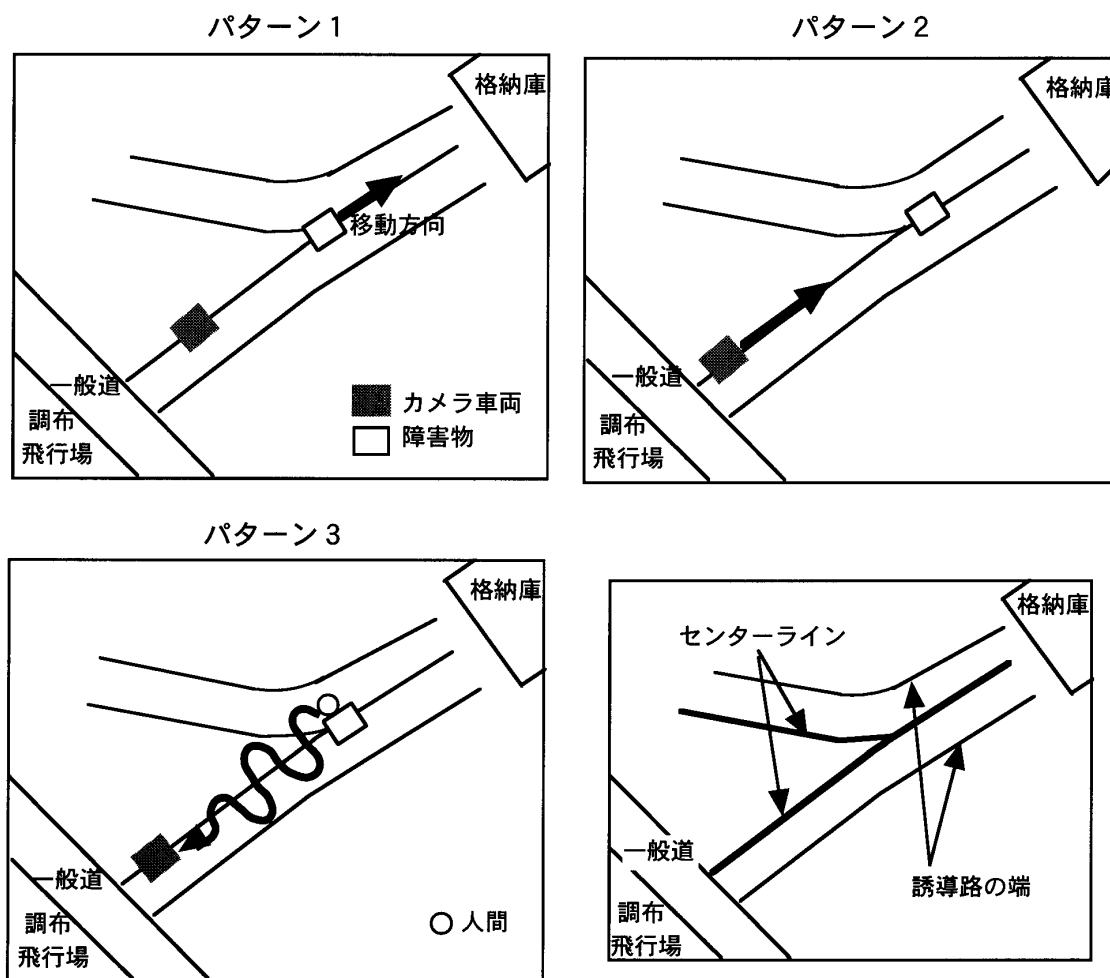


図6.5 実験パターン

ことから決定した。

プログラムの出力は、各 6 パターンそれぞれについてのカメラから検出された障害物までの距離と方向およびキネマティック GPS による障害物までの真の距離と方向の時系列リストである。また、障害物検知プログラム実行時には 2 秒周期の計算に合わせて、カメラ画像の原画像上に、検出した障害物を矩形表示し、障害物検知の様子をビジュアル化した。以下これをビジュアル結果と呼ぶ。図 6. 6 にビジュアル結果の例を示す。図中の白い矩形が検出した障害物であり、黒い線は人工視界（マッチング前）である。

本実験のデータ処理に用いた主なパラメータの値を表 6. 1 に示す。

6. 3. 2 評価方法

評価は以下の 2 項目について行う。

時系列のみた障害物検知

この評価は障害物が検出されているかと、障害物を連続的に追尾しているかを調べるために行った。この評価に用いたデータは、障害物検知プログラムの出力である検出された障害物までの距離と方向およびキネマティック GPS による障害物までの真の距離と方向の時系列リストから、時間対障害物までの距離、時間対障害物の方向

の 2 つを各 6 パターンについて作成したグラフである。障害物検知プログラム実行時に 2 秒周期の計算に合わせて障害物検知の様子をビジュアル化したビジュアル結果も合わせて評価した。

カメラと障害物との距離に対する距離の誤差および方向の誤差の分布

距離の誤差とは、推定した障害物位置とカメラ位置の間の距離と、真の障害物位置とカメラ位置の間の距離の差の絶対値である。方向の誤差とは、カメラ位置から推定した障害物位置への方向ベクトルと、カメラ位置から真の障害物位置への方向ベクトルの間の角度の絶対値である。カメラから障害物までの距離が大きくなる（または小さくなる）につれて、障害物位置の検出誤差がどれだけ大きくなるかを調べた。この評価に用いたデータは、障害物検知プログラムの出力である検出された障害物までの距離と方向およびキネマティック GPS による障害物までの真の距離と方向の時系列リストから、上述の距離の誤差および方向の誤差を求め、カメラと障害物との距離に対する分布を全 6 パターン総合して出力したグラフである。各パターンそれぞれにおける分布図は、データ数が少なく傾向がわかりにくかったため用いなかった。



図 6. 6 ビジュアル結果の例
(白い矩形は障害物、黒い線は人工視界)

表 6 . 1 障害物検知実験に用いた主なパラメータの値

パラメータを使用する区分	パラメータ	値
全体	計算周期	2 [sec]
人工視界作成	焦点距離 f	849.4 [pixel]*
	画像サイズ	幅 (m): 640 [pixel] 高さ (n): 480 [pixel]
カメラ画像処理	ゾーベルサイズ	7
	ゾーベルフィルタのしきい値	40 ~ 60 (パターンによって異なる)
	線分近似時の許容最大誤差	1 [pixel]
	線分の細小長さ	4 [pixel]
障害物抽出	人工視界平行移動幅	m 方向: ± 15 [pixel] n 方向: ± 30 [pixel] 刻み: 1 [pixel]
	人工視界回転幅	± 0.1 [rad] 刻み: 0.02 [rad]
	コストC1無次元化パラメータ	τ : 0.1 [rad] l_{τ} : 10 [pixel]
	コストC1のしきい値	1.3 ~ 1.8 (パターンによって異なる)
	障害物の細小線分数	3本

備考: *実測値である。大きさの分かった物体を既知距離から撮像したときの、CCD面上でのその物体の大きさから、式(3.9)を使って焦点距離 f を計算した。したがって単位は [pixel] となる。

6 . 4 実験結果と考察

時系列でみた障害物検知

距離と方向の時系列的変化を図6.7~図6.10に示す。各図とも上段はカメラから障害物までの水平距離、下段はカメラに対する障害物の方向である。ビジュアル結果は、各パターンそれぞれ特徴的な場面を3カ所抜きだし、図6.11~図6.16に示した。前述の通り、図中の白い矩形は検出した障害物、黒い線は人工視界(マッチング前)を表す。ただし、パターン1の逆方向パターンは強い逆光のため画像データを処理できず結果が得られなかった。またパターン2の逆方向パターンの結果はパターン2と同様であったため省略した。パターン3の逆方向パターンはパターン3'として結果を示す。

[1] パターン1 (図6.7, 図6.6, 図6.11, 図6.12)

パターン1は、直線コースで自動車1台が遠ざかっていくパターンである。図6.7を見ると、距離については、カメラからの距離が約40mまでの間は真値と推定値がほぼ一致しており、かなり精度良く検出できた。しかし約40mを越えればばらつきははじめ、約70mを超えると検出できなかった。一方、方向は、遠くて検出できなかった箇所を除けばコンスタントに障害物の真値を追従して検出できた。

図6.11, 図6.12は図6.7中の、の時刻におけるビジュアル結果である。の時刻におけるビジュアル結果は図6.6に例として使用した。図6.6は距離約30m付近に障害物がある場合である。この図のように、距離約30m付近まではほぼ常に障害物をきれいに矩形で囲んで表示できた。人工視界は少しずれているが、マッチングによってその位置をカメラ画像に合わせ、ずらした分を投影変換の逆変換時に反映しているので、結果の距離と方向の数値はこのずれをほぼ含んでいない。図6.11は距離約55m付近の場合である。この距離では、遠くなって障害物が小さくなった分、障害物の大きさに対する矩形の大きさの誤差が大きくなる。これが距離誤差の原因の一つである。図6.12は距離約70mの場合だが、この距離になると障害物は検出されない。これはカメラ画像から障害物の線分が抽出されているが、小さく見えているため線分の本数が少なく、マッチング後に障害物を抽出する際に無視されてしまうからである。

[2] パターン2 (図6.8, 図6.13)

パターン2は、直線コースで自動車1台に対してカメラ車両が近づいていくパターンである。図6.8を見ると、結果の傾向はパターン1とほぼ同じで、これは視点移動しようとも人工視界がコンスタントに誘導路を再現できている証拠である。

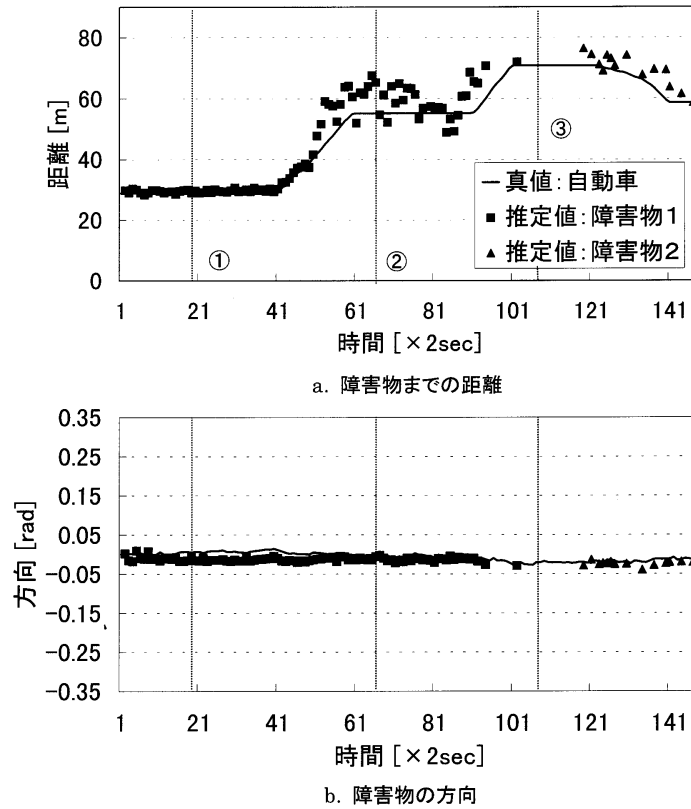


図 6 . 7 障害物までの距離と方向の推定結果：パターン 1

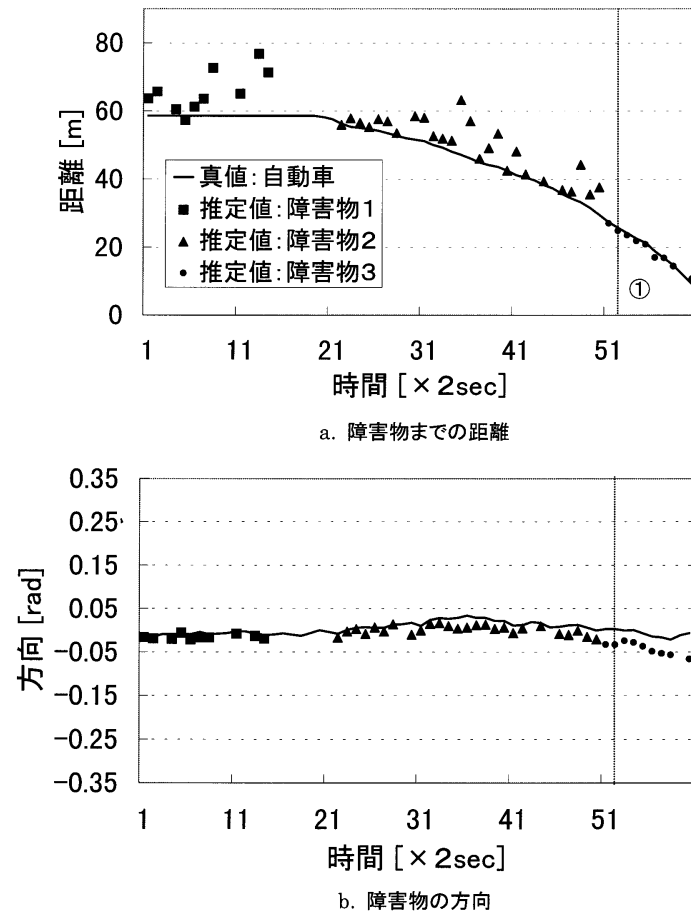


図 6 . 8 障害物までの距離と方向の推定結果：パターン 2

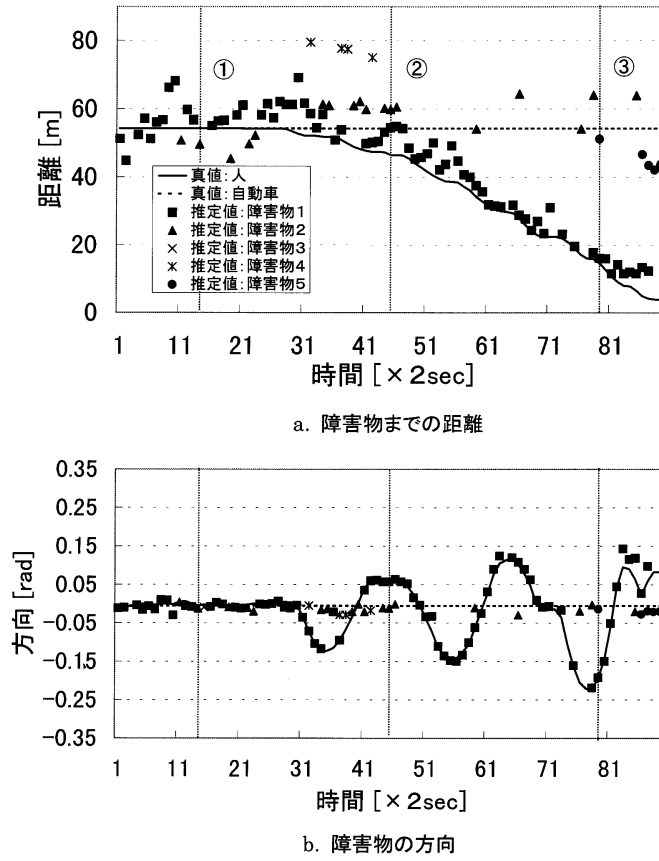


図 6 . 9 障害物までの距離と方向の推定結果：パターン 3

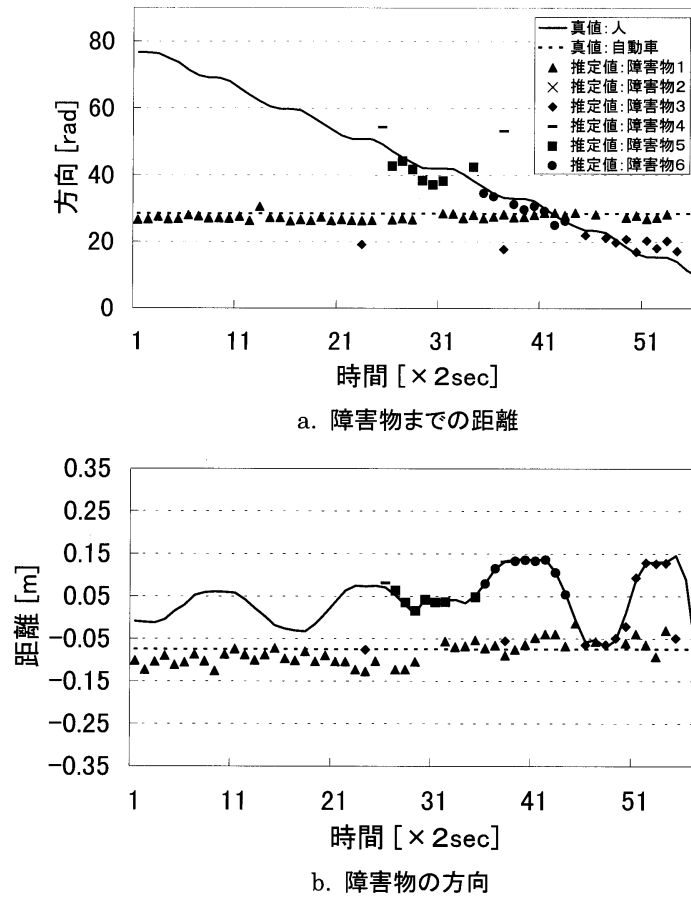


図 6 . 10 障害物までの距離と方向の推定結果：パターン 3'

ビジュアル結果



白い矩形は検出した障害物，黒い線は人工視界（マッチング前）を表す

原画像



図 6 . 11 ビジュアル結果 パターン 1

ビジュアル結果



原画像



図 6 . 12 ビジュアル結果 パターン 1

図 6 . 13 は図 6 . 8 中の の時刻におけるビジュアル結果である。障害物までの距離が遠い(すなわちカメラ車両が一般道に近い位置にいた)間はパターン 1 の図 6 . 6 , 図 6 . 11 と同じ傾向が見られた。図 6 . 13 は距離約 25 m 付近の場合だが、カメラ車両が移動したことで人工視界の形状が前のパターン 1 と大きく違うことがわかる。

移動する最中はこの図のようにカメラ画像に忠実な誘導路の再現ができており、カメラ車両が移動したせいで障害物検知の性能がパターン 1 より劣ることは、ほぼなかった。

[3] パターン 3 (図 6 . 9 , 図 6 . 14 ~ 図 6 . 16)

パターン 3 は、直線コースで自動車が静止し、人間が

ビジュアル結果



原画像



図 6 . 13 ビジュアル結果 パターン 2

近づいてくるパターンである。人間ははじめ自動車と同じ位置にいるが、そこから蛇行しながら歩いてきて、最後はカメラ車両の目前まで来る。障害物用のGPSアンテナは人間が持っていたので、結果の自動車の真の位置は、はじめに人間と一緒にいたときの位置を使用した。

図 6 . 9 を見ると、人間の検出についてはパターン 1、

2 と同様の傾向を見て取れるが、自動車は人間の後方にある影響でほとんど検出されなかった。

図 6 . 14 ~ 図 6 . 16 は図 6 . 9 中の ~ の時刻におけるビジュアル結果である。図 6 . 14 では人間と自動車はそばにおり、1 つの障害物として検出されたが、図 6 . 15、図 6 . 16 では人間が蛇行しながら歩いてきているた

ビジュアル結果



原画像



図 6 . 14 ビジュアル結果 パターン 3

め、それぞれ別の障害物として検出された。この図のように他の時間においても人間についてはほぼ検出されていた。

[4] パターン 3 '(図 6 . 10)

パターン 3 は、パターン 3 の撮影方向が逆のパターンである。人間ははじめ自動車はるか向こうにいるが、そ

こから蛇行しながら歩いてきて、最後はカメラ車両の目前まで来る。障害物用の GPS アンテナは人間が持っていたので、結果の自動車の真の位置は、実験後にアンテナを自動車に移動させた際の位置を使用した。なお、ビジュアル結果はパターン 3 と同様であるため省略した。

図 6 . 10 を見ると、パターン 3 に比べて自動車の位置

ビジュアル結果



原画像



図 6.15 ビジュアル結果 パターン 3

が距離約 30 m と近かったため、自動車がほとんど消えることなく検出されていた。人間は距離約 80 m という他のパターンに比べてかなり遠い位置から歩き始めたので、はじめのうちは全く検出されなかったが、近づいて来るにつれて検出されるようになった。この図から、人間については距離約 50 m が検出限界であると見て取れる。人

間の方が検出限界距離が小さいのは、同じ距離にいても人間の方がカメラ画像から取り出される線分の本数が少ないため、マッチング後の障害物抽出時に消去されてしまうからである。

ビジュアル結果



原画像



図 6 . 16 ビジュアル結果 パターン 3

カメラと障害物との距離に対する距離の誤差および方向の誤差の分布

カメラと障害物との距離に対する距離の誤差および方向の誤差の絶対値の分布をそれぞれ図 6 . 17, 図 6 . 18 に示す . これらの誤差は , 障害物の真値と推定値の差の絶対値である . なお路面の凹凸など明らかに障害物以外

のものを抽出したと思われる推定障害物については , この図の対象から外した .

[1] 距離誤差について (図 6 . 17)

図 6 . 17 を見ると , 距離誤差は距離 30 m くらいまでは 5 m 以下 , 距離 60 m まで離れても 20 m 以下である . データが距離約 70 m までしかないことから , 障害物 (自動車)

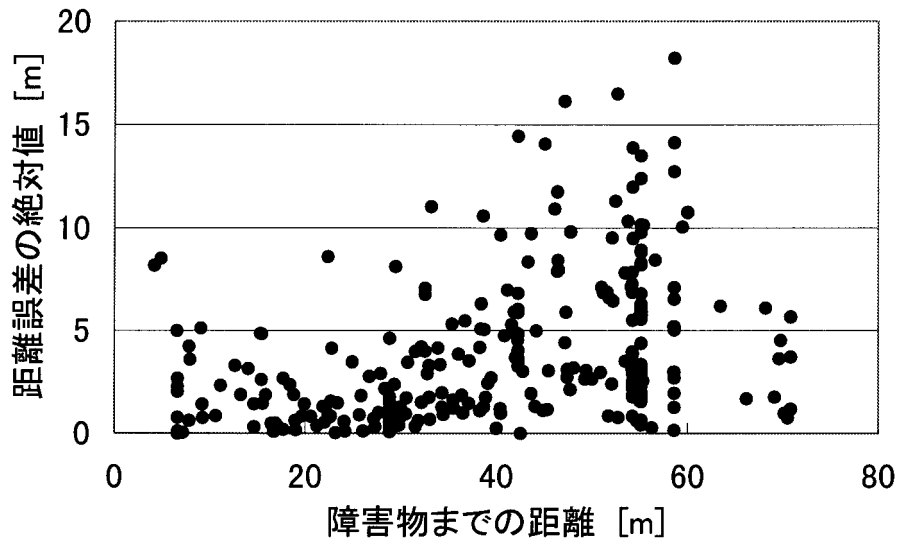


図 6 . 17 障害物までの距離に対する距離誤差の分布

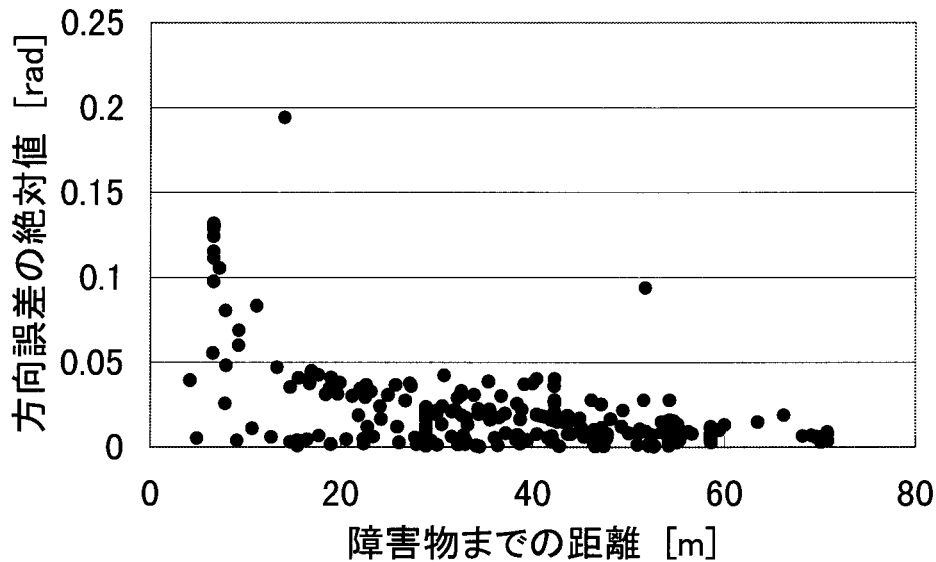


図 6 . 18 障害物までの距離に対する方向誤差の分布

の検出の限界距離が約70 mであることがうかがえる(図 6 . 10によれば人間の検出の限界距離は約50 mだがこの図からはわからない)。

また図 6 . 17 から、距離とともに距離誤差が増大していくという傾向が見られる。以下その傾向について述べる。今、図 6 . 19 のように高さ h の点 O に地面との角度が q となるようにカメラを置き、点 O から水平距離 D_0 の点 Q が画像の中心になるように撮影しているとする。このとき画像平面は、直線 OQ に垂直で、点 O から直線 OQ 上を焦点距離 f 離れた点 P_0 を通る平面に相当する。そして画像上に点 P をとり、点 P と点 P_0 との距離を v とする。また直線 OP 、直線 OP_0 間の角度を a とおく。画面上の点 P は地面の点 P_D を写した点である。この点 P_D とカメラの

間の水平距離を D とおき、この D と D の誤差との関係が、図 6 . 17 の距離と距離誤差の関係に相当する。ここで、 D_0 、 a 、 q 、補助線 QP_v の長さ V はそれぞれ以下のように表せる。

$$D_0 = h / \tan q \quad (6.1)$$

$$a = \tan^{-1}(v/f) \quad (6.2)$$

$$q = \tan^{-1}(h/D_0) \quad (6.3)$$

$$V = \sqrt{D_0^2 + h^2} \tan a \quad (6.4)$$

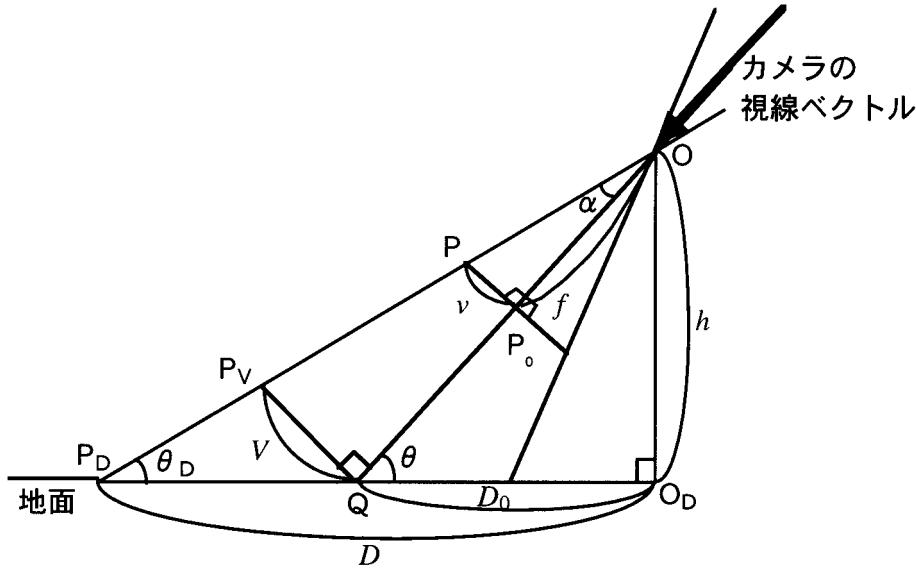


図 6 . 19 距離と距離誤差の関係

また直線 OP_0 と地面との間の角度 α_D は

$$\alpha_D = \alpha - a \tag{6.5}$$

この時カメラから点 P_D までの水平距離 D は次のように表せる .

$$D = V \cos (90 - \alpha) + \frac{V \sin (90 - \alpha)}{\tan \alpha_D} + D_0 \tag{6.6}$$

上式から V と α_D を消去すれば

$$D = D_0 + \frac{v \sqrt{D_0^2 + h^2}}{f \sin \alpha - v \cos \alpha} \tag{6.7}$$

ここで

$$\begin{aligned} a_1 &= D_0 (= h / \tan \alpha) \\ a_2 &= \sqrt{D_0^2 + h^2} (= h / \cos \alpha) \\ a_3 &= f \sin \alpha \\ a_4 &= \cos \alpha \end{aligned} \tag{6.8}$$

とおくと , (6.7) 式は

$$D = a_1 + \frac{a_2 v}{a_3 - a_4 v} \tag{6.9}$$

となる . 上式を v で微分すると

$$\frac{\partial D}{\partial v} = \frac{a_2 a_3}{(a_3 - a_4 v)^2} \tag{6.10}$$

ここで $(\partial D / \partial v)$ を D' とおけば

$$D' = \frac{a_2 a_3}{(a_3 - a_4 v)^2} \tag{6.11}$$

最後に (6.11) 式と (6.9) 式から v を消去すると , 「画像上の位置が 1 画素ずれた場合」の距離と距離誤差の関係が得られ以下ようになる .

$$D' = \frac{\{a_4(D - a_1) + a_2\}^2}{a_2 a_3} \tag{6.12}$$

(6.12) 式の関係に既知のパラメータの値を代入してグラフに表すと図 6 . 20 のようになる . これではまだ図 6 . 17 の実験結果との対応ははっきりとしないが , (6.12) 式の右辺に 6 をかけると図 6 . 21 のようになり , 図 6 . 17 の分布の上限にそのような曲線が得られる . 従って , 実験結果の分布図では画面上の位置で最大およそ 6 画素程度のずれが生じていることがわかる . 本報告には示さなかったが , マッチング後の人工視界の位置をビジュアル結果で調べたところ , 6 画素程度のずれを残していた場面がところどころあった . またカメラ画像から抽出した線分が障害物を表すのに十分でない数の (欠けている) ときも位置誤差として表れるが , この「欠け」も最大 6 画素程度になるときがあり , これも誤差の要因の一つである .

[2] 方向誤差について (図 6 . 18)

図 6 . 18 を見ると , 方向誤差は距離 10 m 以下では 0.15 ラジアン (約 8.6 度) と大きい , 10 m 以上では , 大きくても 0.05 ラジアン (約 3 度) 以下であり , 良好な精度

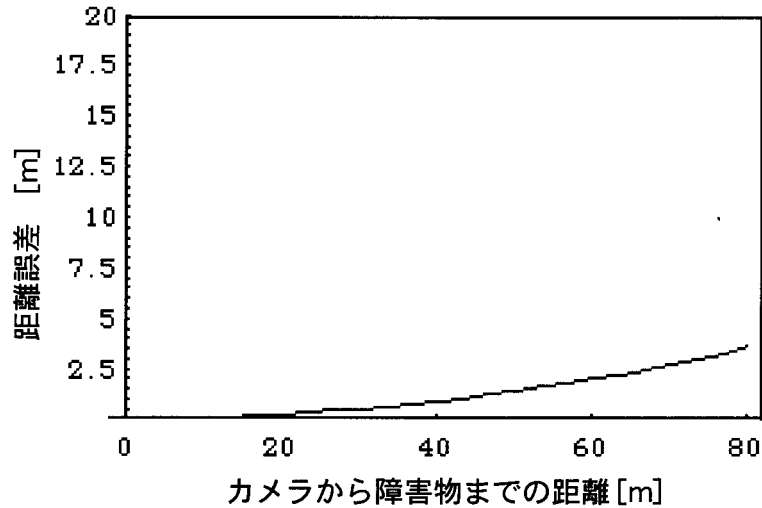


図6.20 画像上での位置が1画素ずれたときの距離と距離誤差の関係

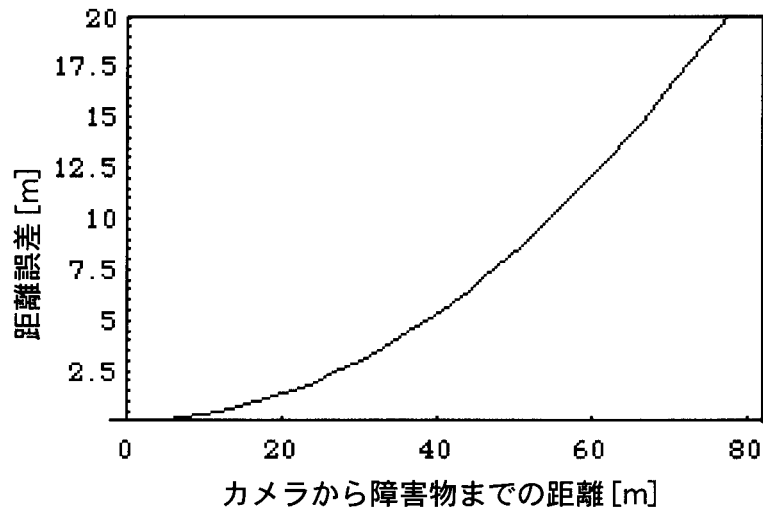


図6.21 画像上での位置が6画素ずれたときの距離と距離誤差の関係

であると言える。

この図を見ると、距離が近いほど方向誤差が大きい。これはある大きさの障害物が距離とともに視界のどのくらいの角度を占めるかを調べた方がわかりやすい。

今、図6.22のように点Oにあるカメラから距離 F の点Qにある障害物を撮影しているとする。このとき障害物の端の位置を点Pとし、線分PQの長さ(障害物の幅の2分の1)を W とおけば、直線OQ、OP間の角度 b は

$$b = \tan^{-1}(W/F) \quad (6.13)$$

$W = 1$ とし、上式の F と b の関係をグラフに示すと図6.23のようになる。すなわち、距離が近くなればなるほど、視界に占める大きさが急激に大きくなる。したがって、障害物までの距離が近ければ近いほど、障害物の中

心の位置がずれるなどの影響を大きく受けて、方向誤差が大きくなる。

しかし、この結果のように距離10m以下で急に方向誤差が増大しようとも、距離10mという非常な近距離に障害物があること自体が相当な問題である(緊急停止してもぶつかる可能性が大きい)から、このことは問題ではない。むしろ前述のように、距離10m以上でほぼ0.05ラジアン以下の精度を保っていることがシステムの性能の良さを示している。

上記の[1]距離誤差、[2]方向誤差の要因について、カメラの取り付け誤差については考慮していない。これは、本システムでは、距離と方向の推定をキネマティックGPSによる人工視界上で行なっているためである。キネマティックGPSの位置誤差は数cm、角度誤差は 0.1° 。

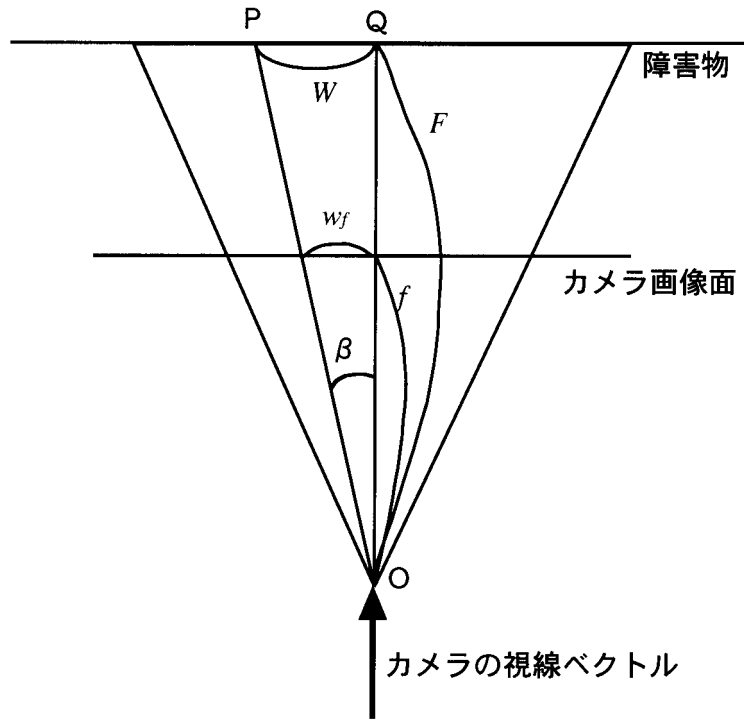


図 6 . 22 障害物までの距離と方向の関係

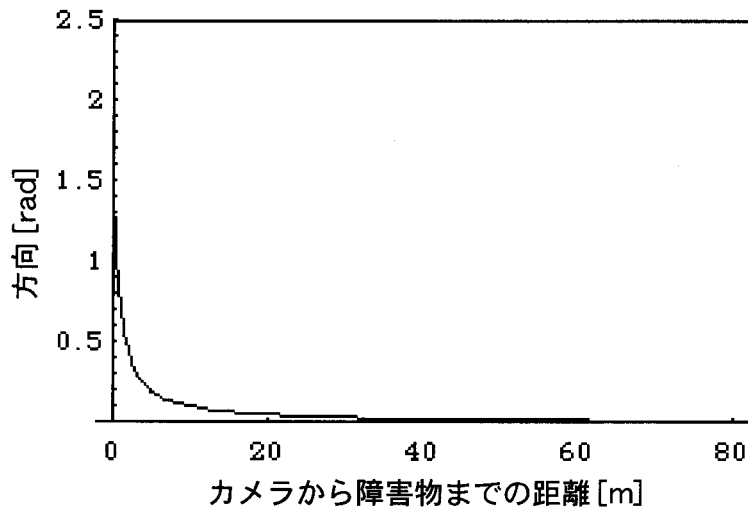


図 6 . 23 障害物が向かって中央から 1メートル真横にずれたときの距離と方向の関係

以下と、ここで議論している値よりはるかに小さい。

評価のまとめ

評価項目 , の結果をまとめると以下のようになる。(ただし、本実験で採用したパラメータ値における性能であり、パラメータの選び方によって変わることがある。)

- ・ 障害物検知に成功した場合は、画面上ではほぼ完全に真の障害物に一致した位置を得られた。
- ・ 検知の成功率は自機、障害物ともに静止している場

合は距離 30 m 付近では約 80% (パターン 1 では 100%) であった。自機または障害物が移動する場合は若干低下した。成功率は障害物までの距離が大きくなるにつれて低下し、70 m 付近で完全に検知できなかった。

- ・ 誤検知をする場合があった。
- ・ 距離誤差は自機、距離 30 m までは約 5 m 以下 (障害物ともに静止している場合は 2 m 以下)、それ以上の距離でも 20 m 以下であった。

表 6. 2 誘導路上での航空機の走行速度 (図 1. 1 参照)

タクシー・フェーズ	タクシー・スピード [km/h]	1 秒間に進む距離 [m]
Normal/Apron - straight -	19 - 56	5 - 16
Normal/Apron - curve -	19 - 37	5 - 10
stand	0 - 19	0 - 5

- ・方向誤差は終始約 0.05 ラジアン(約 3 度)以下であった。
- ・計算時間はカメラ画像のサイズが 640 × 480 [pixel] の場合 2 秒以下であった(障害物までの距離による)。

障害物検知を考える場合まず検出すべき障害物を検出できているかということが問題になるが、上記の結果から、距離が近い場合はほぼ検出できていたと言える。

その次の問題として、障害物が検知できた場合に障害物にぶつかることなく自機を停止(または回避)できるかという問題がある。障害物を検知した場合に自機が停止するとすれば、事故を防ぐためには、システムの計算時間(2 秒)中に走行する距離とブレーキがかかり始めてから自機が止まるまでに走行する距離の和が検知した障害物までの距離より小さくしなければならない(文献 6)によれば、誘導路における航空機の走行速度は表 6. 2 に示す通りである(図 1. 1 参照)。表 6. 2 には合わせて各速度において 1 秒間に進む距離を示した。Normal/Apron 誘導路(直線)での最高速度は 56 km で、その速度では 1 秒間に約 16 m 走行する。本システムの計算時間は 2 秒であり、計算する間に 32 m 走行していることになる。以上の点から、障害物回避のためには、計算時間の短縮と検知距離の引き上げの必要性が予測される。

7 おわりに

7. 1 成果のまとめ

本研究の成果をまとめると以下の通りである。

- ・キネマティック GPS とカメラ画像を複合化させた障害物検知システムを提案した。これまでに GPS を障害物検知に使用した研究はなく、本研究で初めて提案されたシステムである。そのようなシステムの性能を評価するため、実験システムおよび必要な計算機ソフトウェアを製作し、誘導路におけるアルゴリズム評価実証実験を行った。
- ・評価実証実験の結果、自機および障害物も静止した場合、約 30 m 離れた普通乗用車を、2 秒間隔でほぼ

欠損無く(80%以上)検出し、その相対位置を距離誤差約 2 m、方向誤差約 0.05 ラジアン(約 3 度)の精度で推定することができた。直線コース・カーブコースの区別なく、障害物が人間である場合や、自機または障害物が移動する場合でも若干の性能低下はあるがほぼ同程度の結果が得られた。また、検出率、相対位置精度ともに障害物までの距離が増大するにつれてその性能が落ちることがわかった。自動車の検出限界(完全に検出できなくなる距離)は約 70 m、人間の検出限界は約 50 m であった。

- ・実験結果を踏まえ、本システムが誘導路における障害物検知に将来有望であり、自動タクシーガイダンスまでを含む航空機の空港面内の管制誘導の可能性が示された。

7. 2 今後の課題

航空機の自動離着陸におけるタクシーガイダンスでの実利用を考えた場合、本研究で提案した障害物検知システムはまだ以下に挙げた課題を残している。

計算時間の短縮化

現在は計算時間は最大 2 秒かかることがあるが、実利用における完全性を考えるならば、ビデオレートでの検出が望ましい。計算時間短縮のためには、画像処理においては画像処理専用のコンピュータを導入すること、アルゴリズム全体ではさらなる計算効率向上のための工夫が必要である。

リアルタイムシステムの構築

今回はオフラインシステムを構築して実証実験を行ったが、キネマティック GPS の情報をリアルタイムで取り込み、本障害物検知システムをリアルタイムで実証することが必要である。航空宇宙技術研究所では航空機にリアルタイムキネマティック GPS のシステムを搭載した飛行実験をすでに行っており、キネマティック GPS の情報をリアルタイムで取り込むことは十分可能である。

カメラ画像処理の性能向上(検出限界の引き上げおよび誤検出の排除)

今回の研究では、カメラ画像処理の性能に問題があり、その影響を受け障害物検知の性能も低下した。一つは検出限界の制限であるが、これはカメラ画像の解像度や線分抽出などの様々な要素が原因となっており、解決は難しい問題である。もう一つは誤って障害物以外のものを検出してしまふ誤検出の問題であるが、これはエッジ抽出および線分抽出の性能によるところが大きい。本論文で示した実験ではエッジ抽出のしきい値を実験パターン別に手入力したが、各画像ごとに安定した量のエッジ抽出をできるしきい値の自動決定ができるようになれば、誤検出は少なくなると思われる。本研究でも試験的にヒストグラムを用いたしきい値の自動決定を試みたが、結果があまり良くなかったため、アルゴリズムに組み入れるには至らなかった。

さらに、以下に挙げる性能を障害物システムに組み込めれば、さらに実用的なシステムとなることが予想される。

障害物を含むクリアーな人工視界のディスプレイ表示
現在高速飛行をすることで有名なコンコルドは、空気抵抗などの問題から機体の先が鋭く、コックピットからは前方が見にくい形状となっている。従って、着陸時には首を曲げてコックピットを前方に傾けている。しかし、コックピットから見える誘導路（および滑走路）の形状を正確に再現したクリアーな人工視界に障害物をディスプレイ表示することができれば、前方の認識のためにわざわざ首を曲げるような大きな代償をばらう必要はなくなる。

航空宇宙技術研究所では現在、次世代超音速機 SST (Supersonic Transport) の研究開発を行っている。この SST は飛行速度を上げるため機体のノズルは細く、コックピットからは前方が極めて見難い形状となっている（コンコルドとの大きな違いは、機体強度および軽量化の観点から、首をおらない構造になると考えられている）。従って、障害物を含むクリアーな人工視界のディスプレイ表示ができるようになれば、この SST への応用も有望であろう。

障害物の同定

障害物の種類（航空機であるか自動車であるかなど）を同定し、その動きを正確に追跡できれば、その障害物の将来の動きが予想できるようになる。そして障害物の予想した動きに合わせて効率的な自機の動作を決定することができるようになる。

参考文献

- 1) Robert L. Schultz, Donald A. Shaner and Yiyuan Zhao : Free-Flight Concept, AIAA paper 97-3677, 1997.
- 2) John E. Robinson, Thomas J. Davis, Douglas R. Isaacson : FUZZY REASONING-BASED SEQUENCING OF AIRCRAFT IN THE TERMINAL AREA, AIAA paper 97-3542, 1997.
- 3) 張替正敏：航空機の精密進入着陸のための DGPS/INS 複合航法システム, 日本航空宇宙学会誌 第45巻, 1997, pp484-490.
- 4) 張替正敏, 辻井利昭, 加藤智子：自動着陸のための GPS 航法と画像情報との融合に関する考察, 第14回誘導制御シンポジウム, 1997, pp71-77.
- 5) Ing. Klaus Mohlenkamp : Automatic Control Steps for Aircraft Taxi Guidance, AGARD Meeting on Machine Intelligence in Air Traffic Management, 1993, pp28-1, 28-5.
- 6) Cassell Rick, Bradfield Scott, Smith Alex : Airport surface RNP (Required Navigation Performance) - Implications for GNSS, Proceedings of the Inst. of Navigation National Technical Meeting, 1997, pp71-80.
- 7) 辻井 利昭, 村田正秋, 張替正敏：二周波 GPS 受信機に対する高速度 OTF アルゴリズムと飛行実験による評価, 計測自動制御学会論文集 Vol.33, No.8, 1997, pp743-751.
- 8) Toshiaki Tsujii, et. al. : AIRBORNE KINEMATIC ATTITUDE DETERMINATION USING GPS PHASE INTERFEROMETRY, Advances in the Astronautical Sciences, Volume 95, pp827-838.
- 9) Michael A., Edwards AFB.: Global Hawk Begins Flight Test Program, Aviation week & Space Technology, 1998, pp22-23.
- 10) Stanley L, Zimmerman: Development and Test of a Pilot Display for Surface Operations, SAE Technical Paper series 942092, 1994.
- 11) 小川寛一：わが国における次世代道路交通システムの動向と展望, 電子情報通信学会技報, 1997, pp47-55.
- 12) 早船一弥, 渡辺武司：運転支援システムにおける走行環境認識の現状と課題, 電子情報通信学会技報, 1997, pp65-72.
- 13) 太田直哉, 大中慎一, 亀井俊男, 土屋徹雄, 溝口正典：3次元環境モデルを持った自立走行視覚システム, 電子情報通信学会技報, 1994, pp57-64.
- 14) 下村倫子：曲線路におけるステレオ画像処理による先行車追従の検討, 電子情報通信学会技報, 1997, pp15-23.
- 15) 西村敏充, 金井喜美雄, 村田正秋：航空宇宙における誘導と制御, 社団法人計測自動制御学会, 1995.
- 16) 土屋 淳, 辻 宏道：GPS 測量の基礎, 社団法人日本測量協会, 1995.

- 17) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 財団法人 東京大学出版会, 1993.
- 18) 谷口慶治: 画像処理工学 - 基礎編 -, 共立出版, 1997.
- 19) 堀木 秀司, 渡辺 孝志, 木村 彰男, 田山 典男: デジタル直線の標本化誤差を考慮した組み合わせハフ変換の改良, 電子情報通信学会論文誌D- , Vol. J78-D- , No.12, 1995, pp1767-1776.
- 20) 森 俊二, 坂倉 柊子: 画像認識の基礎 [I]- 前処理と形の特徴抽出 -, オーム社, 1991.
- 21) 現代測量学出版委員会: 現代測量学・第 1 巻 測量の数学的基礎, 社団法人日本測量協会, 1981.

や宇宙の移動体の位置・速度および時刻を瞬時にかつ高精度に決定できる。

GPS は, 宇宙部分, 地上制御部分, 利用者部分の 3 つのサブシステムより構成されている (図 A1)^{15) 16)}。

宇宙部分は GPS 衛星群から構成される。その軌道配置は, 赤道面傾斜角 55° , 軌道高度約 20,200 km, 周期約 12 時間 (恒星時) の略円軌道で, 昇交点経角が 60° 毎離れた 6 軌道面にそれぞれ 4 衛星ずつ配置されている。各衛星には原子時計 (セシウムとルビジウム) がそれぞれ複数台ずつ搭載され, 正確な時刻を保持して地上に電波信号を発信している。電波信号は L1 波 (1.57542 GHz, 波長約 19 cm) と L2 波 (1.2276 GHz, 波長約 24 cm) と呼ばれる 2 つの搬送波を変調することによって送られる。信号としては, C/A コードおよび P コードと呼ばれる PRN (疑似雑音) コード (図 A2), そして航法メッセージの 3 つがある。PRN コードは, 0 と 1 (または +1 と -

付録 A GPS 概論

GPS (Global Positioning System, 全世界測位システム) は, 米国防総省が開発運用している人工衛星を利用した電波航法システムである。これにより地表はもとより空

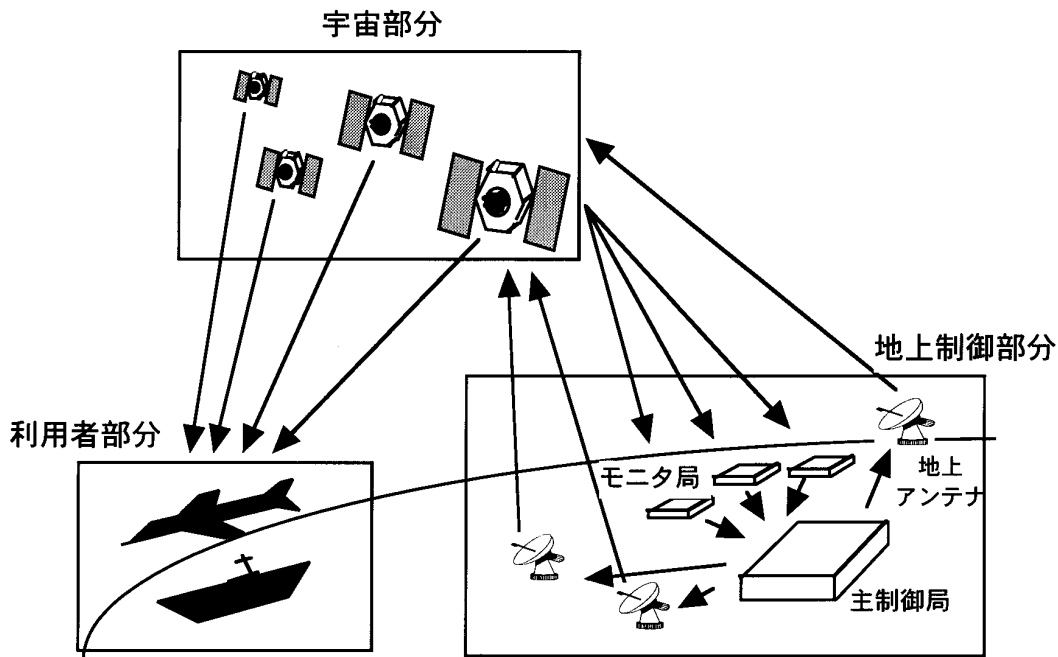


図 A1 GPS システムの構成

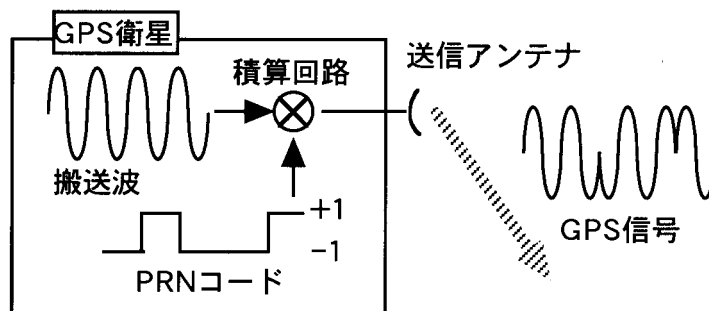


図 A2 GPS の電波信号

1) をランダムに並べた符号列で、GPS 衛星毎に独自の符号列が割り当てられている。受信機はこの符号列を解読することによって衛星を識別する。PRN コードの最も重要な役割は、これを用いて衛星と受信機間の距離を測定できることである。C/A コードは民生用の信号で、チップレートは 1.023 M ビット、L1 搬送波のみを変調して送信されている。一方、P コードは軍関係者のみがアクセスでき、チップレートは 10.23 M ビット、L1 および L2 両搬送波を変調して送信されている。また衛星の位置予測用の軌道情報(放送暦)、衛星時計を補正する係数、現在の電離層遅延の補正パラメータなどの航法メッセージも PRN コードとともに搬送波を変調して送信される。

地上制御部分は、GPS 衛星の追跡管制を行う。通常の衛星管制の他に、世界の配置された 5 つの追跡局における追跡データに基づいて精密軌道決定を行い、その結果から航法メッセージを作成し衛星にアップデートする。

利用者部分は衛星からの電波信号を受信して測位を行う GPS 受信機である。通常、アンテナ、受信プロセッサ、表示装置からなる。GPS 受信機は衛星信号を受信・解読して、PRN コードを用いて衛星から受信機までの伝搬時間を測定する。これに光速を掛けると衛星 - 受信機間の距離となる。この距離は衛星および受信機の時計の誤差を含むため、疑似距離 (Pseudorange) と呼ばれる。GPS では、衛星時計は長期安定な原子時計であるが、受信機の時計は安価な水晶時計を採用し、その時計誤差はひとつの未知数として解くものと想定している。従って、GPS における 3 次元測位では、位置座標 と時計誤差 の 4 個が未知数となり、少なくとも 4 衛星に対する同時の疑

似距離測定が必要になる (図 A3)。

GPS における測位基準として、世界測地系 WGS84 (World Geodetic System 1984) という基準座標系が採用されている (図 3.2 (a))。GPS 受信機によって得られる測位解はこの WGS84 座標系に関する 3 次元位置座標、またはそれを準拠楕円体に関する測地座標に変換した緯度・経度・楕円体高 (準拠楕円体表面からの鉛直高さで、標高等とは異なる) である。

米国政府は GPS の概念設計段階では、民生用の測位精度を 300 ~ 500 m 程度と見込んでいた。ところが、実際に GPS 試験衛星 (ブロック 型衛星と呼ばれる) を打ち上げて測位性能試験を行ったところ、民生用の C/A コードによる測位でも 20 ~ 30 m の精度で位置を決定できることが判明した。因みに軍用の P コードによる測位精度は 20 m 以内である。このため、安全保障上危機感を抱いた米国防総省は民生用の測位精度を意図的に劣化させることを検討し、いわゆる選択利用性 SA (Selective Availability) を発動した。すなわち SA では、衛星の原子時計から作られる基準周波数に不規則なゆらぎを与え、また航法信号のなかの衛星位置を計算するパラメータに誤差を入れ込むことによって、疑似距離データにやく 30 m 相当の時変な測距誤差を付加する。これによって結果的に 100 m 相当の測位誤差 (平面内) を生じる。P コードのユーザー (主に軍関係) は、SA 誤差を除去する情報が与えられるとされ、本来の測位性能をキープできる。

このような結果、今日では C/A コードによる単独測位精度は 95% (すなわち 2σ) の保証誤差で水平面で 100 m、高度で 160 m となっている。P コードユーザーの測位

全 GPS 衛星は原子時計による正確なタイミングで測位用信号を発信
各衛星の位置は軌道情報により計算可能

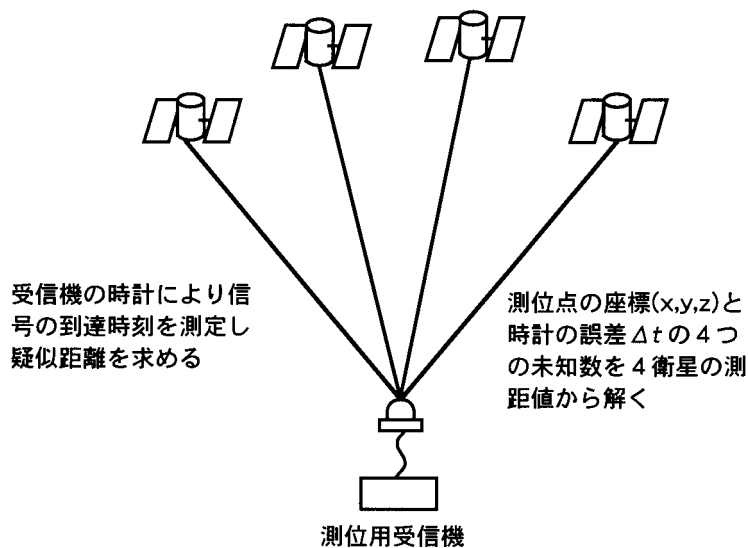


図 A3 アンテナ位置の推定

精度は従来通り 20 m を期待できる .

付録 B Sobel フィルタ

本文でSobelフィルタが雑音低減とエッジ検出の両方の機能をもつフィルタであることを述べた .ここではSobelフィルタがどのようなフィルタであるか説明する .

$f(x, y)$ の x 方向の 1 次微分 $\partial f / \partial x$, y 方向の 1 次微分 $\partial f / \partial y$ を差分 $f_x(m, n)$, $f_y(m, n)$ で近似すると (*), これらの値はおの次のようになる .

$$f_x(m, n) = f(m+1, n) - f(m, n) \tag{B1}$$

$$f_y(m, n) = f(m, n+1) - f(m, n) \tag{B2}$$

上の式で差分演算を行うと雑音の影響を強く受けるので, この影響を除くためマスクを 2×2 として次のような式で演算を行う (図 B1).

[1 次差分フィルタ (m 方向 ; 2×2)]

$$g(m, n) = (-1) \cdot f(m, n) + f(m+1, n) + (-1) \cdot f(m, n+1) + f(m+1, n+1) \tag{B3}$$

[1 次差分フィルタ (n 方向 ; 2×2)]

$$g(m, n) = (-1) \cdot f(m, n) + (-1) \cdot f(m+1, n) + f(m, n+1) + f(m+1, n+1) \tag{B4}$$

しかし, こうして得られる $f_x(m, n)$, $f_y(m, n)$ は, 厳密には座標 (m, n) ではなく, 半画素ずれた 1 次差分値となる . そのため, 一般には次式のように 1 画素を置いて差分の計算をする (図 B2).

(m, n)	$(m+1, n)$
$(m, n+1)$	$(m+1, n+1)$

(a) 2×2 マスク

-1	1
-1	1

(b) 水平方向一次差分

-1	-1
1	1

(c) 垂直方向一次差分

図 B1 一次差分フィルタ (2×2 マスク)

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

(a) 水平方向一次差分

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1

(b) 垂直方向一次差分

図 B2 一次空間差分フィルタ
(3×3 マスク : 注目画素は中心の画素)

$$f_x(m, n) = f(m+1, n) - f(m-1, n) = (-1) \cdot f(m-1, n) + 0 \cdot f(m, n) + (+1) \cdot f(m+1, n) \tag{B5}$$

$$f_y(m, n) = f(m, n+1) - f(m, n-1) = (-1) \cdot f(m, n-1) + 0 \cdot f(m, n) + (+1) \cdot f(m, n+1) \tag{B6}$$

すると 3×3 の 1 次差分フィルタは次式のようになる .

[1 次差分フィルタ (m 方向 ; 3×3)]

$$g(m, n) = (-1) \cdot f(m-1, n-1) + f(m+1, n-1) + (-1) \cdot f(m-1, n) + f(m+1, n) + (-1) \cdot f(m-1, n+1) + f(m+1, n+1) \tag{B7}$$

[1 次差分フィルタ (n 方向 ; 3×3)]

$$g(m, n) = (-1) \cdot f(m-1, n-1) + (-1) \cdot f(m, n-1) + (-1) \cdot f(m+1, n-1) + f(m-1, n+1) + f(m, n+1) + f(m+1, n+1) \tag{B8}$$

さてこの 1 次差分フィルタはエッジとともに雑音にも反応してしまうので, 雑音が含まれる画像では雑音の低減をしなくてはならない . 雑音の低減には局所平均化が利用できるので, まずフィルタリングを行って雑音を低減させ, その中間的な出力画像について 1 次差分を行う .

Sobel フィルタは図 B3 のように平均化として注目画素 (m, n) の上下左右の 4 近傍画素の重みをつけたフィルタであり, 次のように表せる .

[Sobel フィルタ (3×3)]

$$g(m, n) = \{ g_{HS}(m, n)^2 + g_{VS}(m, n)^2 \}^{1/2} \tag{B9}$$

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

(a) 水平方向 $g_{HS}(m, n)$

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

(b) 垂直方向 $g_{VS}(m, n)$

図 B3 Sobel フィルタ
(3×3 マスク : 注目画素は中心の画素)

(*) 差分の定義

$$f'(x_i, x_j) = \frac{f(x_i) - f(x_j)}{x_i - x_j} \quad (\text{B10})$$

次のように x の数列に対する関数 $y = f(x)$ があるとす
る .

$f(x)$ の第 1 階差商 (1 次微分に対応) は次式により定
義される .

普通 , x の値は等間隔にとられる . この場合には任意に
与えられた階の差商の分母はすべて等しく , $x_i - x_j = 1$ に
とられる .

航空宇宙技術研究所報告 1395号

平成 11 年 11 月 発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話 (0422) 40-3075 ㊦ 182-8522
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2 - 27 - 12

禁無断複写転載

本書(誌)からの複写, 転載を希望される場合は, 研究支援課資料係にご連絡ください。

Printed in Japan