

海上作業船の位置測定のためのリアルタイム GPS 測量システムの開発

浜田賢二¹・石崎 武²・三浦英夫³・林 忠夫⁴・清水則一⁵・中川浩二⁶

¹正会員 運輸省第四港湾建設局 下関機械整備事務所長 (〒750 下関市阿弥陀寺町6-9)

²運輸省第四港湾建設局 下関機械整備事務所工作課長

³正会員 運輸省第四港湾建設局 前次長

⁴古野電気(株)技術研究所 第3研究室長

⁵正会員 博(工) 山口大学助教授 工学部社会建設工学科

⁶正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

海洋構造物の建設や浚渫などの港湾工事,あるいは,海洋磁気探査や潮位測定などの海洋観測に使用される海上作業船に対する位置測定は,港湾管理などにおける最も基本的な技術である。特に航行中の作業船の位置出しは重要であり,利用の簡便さ,高い精度,ならびにリアルタイム性が要求される。一方,GPSは従来の測量手法にない数々の特徴を有し,新しい測量システムとして様々な分野で応用研究が進められている。もし,このシステムをリアルタイム測量法として,作業船の位置測定に利用できるならば,作業効率および経済性に大きな効果が期待できる。本研究では特に海上作業船の位置測定を対象とし,リアルタイム測量が可能なGPS測量システムを開発し,海上における現場実験を行うことによって開発したシステムの実用化の可能性を検討することを目的とする。

Key Words: GPS, real time surveying system, positioning working vessels

1. まえがき

海洋構造物の建設や浚渫などの港湾工事,あるいは,海洋磁気探査や潮位測定などの海洋観測に使用される海上作業船の位置測定は,港湾管理などにおける最も基本的な技術である。特に,航行中の作業船の位置測定はリアルタイム性が要求される。

従来の作業船の位置測定には,(1)トランシットによる方法,(2)光波測距儀による方法,(3)電磁波測距儀による方法,などの陸上からの測量法,また,船上における(4)六分儀による方法がある。(1)~(3)については,天候の影響を受け易く,また,航行中の作業船を追う際に追従できなくなることがある。また,(4)は凶化などに相当の時間と労力を要し,また,精度が低いという問題点がある。

一方,米国が開発したGPS(Global Positioning System)^{1)~3)}は新しい測量システムとして注目され,様々な分野での応用研究が進められている。それは,人工衛星からの電波を受信し,受信点の位置を三次元的に求めるシステムであり,(1)長基線に対し高精度測量が実現できること,(2)観測点の視通を要しないこと,(3)雨天,霧中,夜間においても測量できること,(4)測量結果を統一した座標(WGS84)で得られること,(5)同時に多点の測量が可能なこと,などの特徴があ

る。いま,このシステムをリアルタイム測量法として,作業船の位置測定に利用できるならば,作業効率および経済性に大きな効果が期待できる。しかし,現在一般的に利用されているGPS測量法では,人工衛星からのデータ受信・記録とデータ解析がオフラインで行われており,実用的なリアルタイム測量システムについては,研究・開発が進められている⁴⁾。

そこで,本研究は特に海上作業船の位置測定を対象とし,リアルタイム測量が可能な受信機を独自に開発し,陸上における基本動作確認実験および海上における現場実験を行うことによって,開発したシステムの実用化の可能性を検討することを目的とする。

なお本論文は,筆者らの発表資料^{7),8)}について,海上作業船の位置測定を行う観点から新たにとりまとめ,考察を加えたものである。

2. リアルタイムGPS測量システムの概要

前述のようにこれまでGPSによる精密測量では,人工衛星からのデータの受信・記録とデータ解析がオフラインで行われるのが一般的であった。しかし,本研究のように航行中の作業船の位置測定では,観測座標をリアルタイムに得る必要がある。

これまでのリアルタイムGPS測量の研究は,受信機

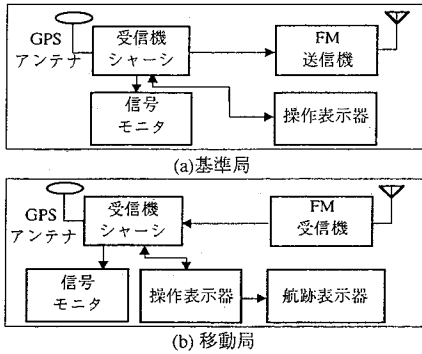


図-1 リアルタイム測定装置のシステム構成

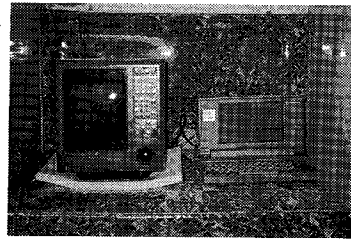
からリアルタイム処理の部分を切り離して開発されている。すなわち、通常の GPS 受信機を用いて移動点と固定点において、それぞれ同時に観測データを一旦収録し、そのデータを用いて、独立して開発したリアルタイム演算処理によって移動局の位置を求めるものである。開発されたリアルタイム処理法を用いれば、市販の測量用 GPS 受信機およびパソコン、ならびに基準局と移動局との間の無線データ伝送手段を用いることによって、リアルタイム測量が可能となる利点がある。しかし、それは受信機や解析処理部をいわばブラックボックスとした利用法で、測量者がリアルタイム動作中の電波受信状況などを確認しながら測量することは難しいという欠点がある。

そこで、筆者らは作業船の位置測量専用リアルタイムで動作する GPS 測量装置を独自に開発することを目的として、これまで受信装置などの開発を行い、いくつかの実験結果については一部公表している^{7),8)}。本章では、本研究において開発したシステムの構成の概要とその特徴について述べる。

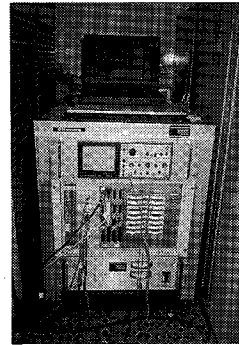
(1) システムの構想

GPS による精密測量には、スタティック方式とキネマティック方式とがあり¹⁾⁻³⁾ (付録 1 参照)、本システムでは後者の方式を用いる。本研究で開発するリアルタイムキネマティック測量装置は、予め座標の知られている位置に設けた固定基準局と作業船上に設置する移動局から構成される (図-1 参照)。基準局では、基準局の観測データを移動局に伝送する無線線を必要とする。また、移動局は自分自身で受信した観測データと、基準局から送られてきた基準局の観測データとを用いて移動局の座標を求める。座標を求める方法には、搬送波の二重位相差を用いる通常の相対測位法¹⁾⁻³⁾を用いる。

さらに、本システムの主な目標性能は次のように設定した。



航跡表示器 A 航跡表示器 B



- ← 表示制御器
- ← 受信モニタースコープ
- ← 精密測位用 GPS 受信機
- ← データ受信機

写真-1 開発したシステムの外観 (受信局側)

①測位 (観測点の座標を求めること) はキネマティック方式に基づく。その精度は、キネマティック GPS で達成可能と考えられ、かつその実現により海洋土木工事の施工精度が大幅に改善されることを想定して、水平および鉛直座標の標準偏差をともに 5cm 以内とする。

②測量に用いる人工衛星からの電波は、民間に解放されている C/A コードを使って得られる GPS 信号の L1 搬送波とする。

③搬送波位相の整数値バイアス (付録 2) を定める初期化については、現状の GPS 技術のレベルと動向および実作業における操作性を考慮して、所要時間を 10 分程度とし、その成功率を 95% 以上とする。もし、初期化に失敗した場合は、5 分以内に失敗を検出し再初期化を自動的に開始する。

④サイクルスリップ (衛星からの電波の受信が中断されること) が一部の衛星に対して発生しても、4 個以上の衛星から受信できる場合は、サイクルスリップの自動修正を行い測量を続行する。

⑤電波を受信できる衛星の数が少なく (3 個以下)、キネマティック測量ができない場合は、次善の精度が得られるディファレンシャル方式³⁾ (DGPS と略称、付録 1 参照、測量精度は水平 1m 以内) で測量する。

⑥測位計算をするための観測データ (搬送波位相の積算値) のサンプリング周期は、CPU の演算能力および船舶航跡を正確にトレースできることを考慮して 1 秒とする。したがって、測量結果は 1 秒毎に得られる。

⑦作業船での利用を考慮し、リアルタイムで測量結果を

表-1 基準局の送信する情報

	分類	情報の内容
1回当たり8衛星分送信	制御項	受信中の衛星番号 観測値の有効フラッグ 観測値の品質
	DGPS補正項	距離補正值(m) 距離補正值変化率(m/s)
	搬送波位相項	積算位相補正值(m) 積算位相補正值変化率(m/s)

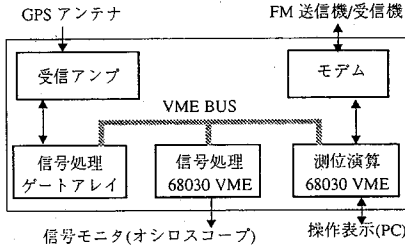


図-2 受信機受信部の構成

表示するビデオ航跡表示装置と接続する。また、将来の利用を考え深淺測量装置などの外部装置と接続できるようにする。

(2) ハードウェア

本システムにおいて開発したハードウェアは、受信アンテナ、受信機、操作表示部、航跡表示部、および基準局データの送受信装置である(写真-1参照)。以下にその概要を述べる。

a) プリアンプ内蔵の受信アンテナ

搬送波位相を利用する測量において精度良く観測点の位置を求めるために、アンテナの製作にあたっては、①マルチパス、および②アンテナの位相中心、について考慮しなければならない。

①マルチパスの問題への対処：アンテナへは人工衛星から直接届く電波だけでなく、特に仰角が低い衛星からは、海面・地面または周囲の山、あるいは人工構造物などで反射された間接波も到来する。これは、一般にマルチパス(multipath)と呼ばれる^{1),2)}。マルチパスによって直接波の位相は乱されるので、測量精度と初期化の性能に悪い影響を与える。ここでは、マルチパスの特性⁹⁾を考慮して、その影響を少なくするため、アンテナ水平面に対し15度以下の仰角から入射する電波に対する感度が低くなる指向特性を与えた。さらに、反射波は偏波面が反転するので、偏波識別度を高くすることによって、マルチパスの影響が低減されるようにした。

②アンテナの位相中心の問題への対処：GPS測量で得られる座標はアンテナの位相中心位置に対するものである。したがって、受信電波の入射方向によってアンテナの位相中心が異なると、測量誤差に直接影響を与えることになる¹⁰⁾。この問題に対処するために、アンテナの位相中心の偏差の標準偏差が2mmとなるマイクロストリップ平面アンテナを独自に開発した。

b) 受信機

受信部の構成を図-2に示す。受信アンプ部ではGPS信号を増幅し周波数変換して、最終的には2ビットのデジタル信号に変換する。このデジタル化された信号は専

用の8チャンネルの信号処理部に供給される。信号処理部は信号処理CPU(68030VME)によって制御され、そこで搬送波位相の積算値、疑似距離位相(C/Aコード位相)および航法メッセージ等の観測生データ^{1),3)}を得る。これらのデータは測位計算部CPU(68030VME)に送られ、基準局では送信データを生成し、移動局ではキネマティック測位解を計算する。

リアルタイム処理の場合、搬送波位相の積算値の連続性が特に重要である。衛星からの電波の受信が中断すると搬送波の積算値に不連続が生じる。これをサイクルスリップと呼ぶ。従来のようなデータ受信と測位のための解析がオフライン処理の場合、サイクルスリップの補正は観測点座標を得るための解析処理中に行い、その影響を取り除くことができる¹⁾。しかし、リアルタイム処理の場合、オフライン処理のようにしてサイクルスリップを補正することは困難であるため、サイクルスリップは測量誤差に直結する重大な問題となる。そこで、本研究で開発した受信機では、電波受信部でサイクルスリップを直ちに検出し、演算部で適切な処理が行えるように独自の工夫を行った⁷⁾。

次に、基準局と移動局のサンプリングタイムの同期の問題が重要である。搬送波位相の積算値は1秒毎にサンプリングするが、サンプリングのタイミングが基準局と移動局とで同期していないと、観測結果の誤差の原因となる。本受信機では内部にGPS時刻に同期したクロックを作り、サンプリングの差を常に1msec以内になるように制御した。最終的には移動局のキネマティック演算部で両者の差を補正して実質的にサンプリングの差がゼロとなるようにした。

c) 操作表示部

本システムでは、パーソナルコンピュータを操作表示部とした。操作表示部はキネマティック演算部との間でデータのやりとりをする。電源立ち上げ時に操作表示部からキネマティック演算部へ、動作モード、基準局の位置、衛星歴などの情報を与える。一方、キネマティック演算部からは、GPS受信状態、キネマティック解、観測生データなどが出力される。また、データ解析に便利のように、観測データと演算処理結果のファイルをハードディスクに保存するようにした。

d) 航跡表示部

海上作業船による利用を考えて、移動局における測量位置のデータをリアルタイムでカラーディスプレイ上に表示する装置を独自に開発した。この装置によると、本システムで得られた航跡を地図データや予め入力した測量線などのマークに重ねて表示できる。また、操船援助装置として、表示画面をモニタしながら測量線に沿った操船を行うことも可能である。

e) 基準局データの送受信装置

リアルタイム GPS 測量には、基準局のデータを無線で移動局へ伝送する手段が必要である。本研究では、測位範囲を拡大するため独自に無線テレメータシステムを開発し、その適用のために郵政省から電波使用の免許を受けた。利用電波は、周波数 70MHz 帯、出力 3watt であり、アンテナ特性、大地の電導率等も考慮して通信可能範囲を計算すると約 15~20km が得られる。また、伝送レートは 2,400BIT/秒で、変調方式はナローバンド FM である。送信機および受信機は、データ伝送エラーレートを低くするために、通過帯域の位相特性の直線性に注意して開発した。

(3) ソフトウェア

a) 基準局受信機のアルゴリズム

基準局受信機は視野内にあるすべての衛星を捕捉するが、データを受信するチャンネル数は 8 なので、仰角 15 度以上の衛星が 9 個以上ある場合は高度の高いものから順に 8 個を選択する。捕捉が完了したら測位計算に必要なデータを移動局へ送信する。送信内容を表-1 に示す。

表-1 において DGPS 補正項、すなわち、各衛星に対する距離補正值項と距離補正值変化率は、予め測量した基準局の座標、人工衛星から送られるデータから計算した衛星の座標および C/A コードの疑似距離測定値から計算する。距離補正值は C/A コードのノイズを低減するためにキャリアスムージング¹⁾を適用して求めた。これらの補正項は、移動局においてディファレンシャル方式による測量とオンザフライ初期化(後述)に用いられる。

搬送波位相項、すなわち、搬送波の積算位相補正值およびその変化率は、搬送波位相の積算値、基準点座標、衛星座標などから求められ、移動局に送信される。移動局においてはそれを用いて 2 重位相差を求め、キネマティック方式の測位計算が行われる。このように搬送波位相の生の観測値ではなく、基準局で処理し補正值の形にして送ることにより、移動局の計算量を少なくする工夫を独自に行った。

b) オンザフライによる初期化

本システムのソフトウェア上で重要な点はオンザフライによる初期化である。これは、移動局のアンテナが移

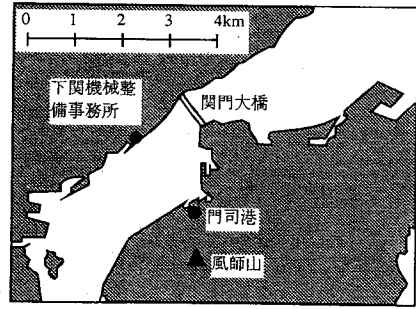
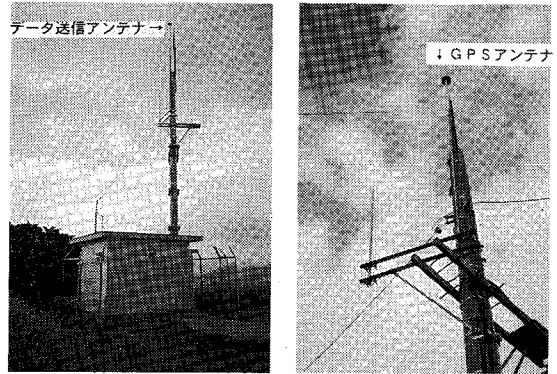


図-3 実験場所付近の平面図



(a) 屋舎 (b) アンテナ頂部

写真-2 基準局

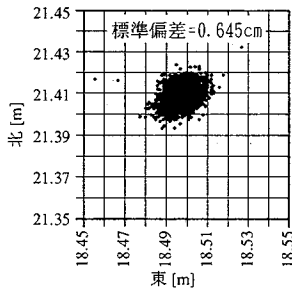
表-2 オンザフライキャリブレーションの結果 (カートによる実験)

状況	所要時間	成否	基線長 (m)	使用した衛星番号
停止中	15.0分	成功	2,776	12, 10, 17, (21), 20, 26
停止中	13.5分	成功	2,776	1, 12, 20, 21, 23, (25)
停止中	7.0分	成功	2,776	12, 20, 21, 23, 25
移動中	4.0分	成功	30	1, 12, 20, 21, (23), 25
移動中	11.0分	成功	30	1, 3, 17, 18, 25, 28, 29
移動中	8.0分	成功	30	1, 3, 17, 18, 25, 28, 29
移動中	4.5分	成功	30	1, 3, 17, 18, 25, 28, 29
移動中	5.5分	成功	30	1, 3, 17, 18, 25, 28, 29

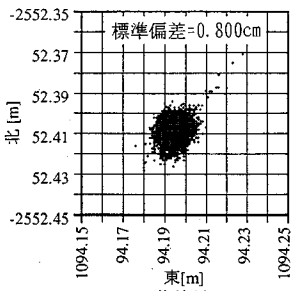
()内の衛星番号は途中から使用した衛星を示す

動中であっても、整数値バイアスが決定できる手法である。GPS による精密測量では、測位解を得るために、搬送波位相の整数値バイアスを求める必要がある¹⁾⁻³⁾。それには、スタティック方式による長時間固定観測データの解析による方法と、キネマティック方式におけるアンテナスワップによる方法などがある。しかし、本研究のようにリアルタイム測量で、かつ、基準局と移動局が離れている状態では、上記の方法を用いることはできない。そこで、本システムではオンザフライ (On-The-Fly) による初期化法を採用した。オンザフライ法にはいくつか提案されているが⁴⁾、本研究では最小自乗法を用いる以下のような方法⁵⁾を用いた。

すなわち、まず初めにディファレンシャル方式³⁾による測位解を中心に、ある範囲内(サーチ空間と呼ぶ)に



(a) 基線長=30 m



(b) 基線長=3 m

図-4 固定点の測量精度-座標値の再現性

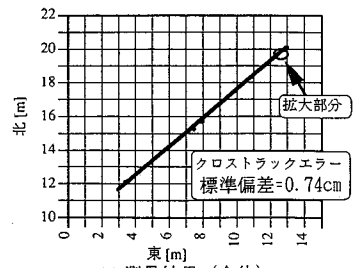
真の解があると考え、次に、受信可能な衛星の中から4個を選び出し、それを第一次衛星群と呼び、その衛星群から得られる3組の2重位相差を用い、サーチ空間内に解を形成する全ての整数値バイアスを解の候補とする。そして、5番目以降の残りの衛星(二次衛星群という)を用いて、解の候補毎に残差を計算し、残差が最小となるものを選ぶことによって、正しい整数値バイアスを求めるものである。整数値バイアスが確定すると衛星と受信局間の距離が測定されたことになり、距離の2重差が求められる。受信局の3次元座標は3組の2重位相差方程式を解くことによって求められる。この方法により得られる座標は標準偏差5cm程度の精度が期待できる。

なお本システムは、実用上はリアルタイム処理であるが、厳密には、無線通信、解析・演算、その他の処理に各々最大約1秒を要するため、全体で最大約3秒の遅れがある。

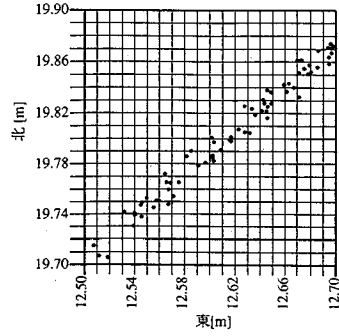
3. 動作確認のための基礎実験

本研究で開発したシステムの動作および精度確認のために、陸上で行った実験について述べる。実験項目は、(1)初期化機能の確認、(2)静止測量精度、(3)移動測量精度、(4)高さ測定精度、(5)アンテナの上下運動に対する追従性、(6)地上描画のトレース実験である。

(1)は測量開始時の初期化の性能を調べるため、(2)



(a) 測量結果 (全体)



(b) 測量結果 (拡大)

図-5 移動局の測量精度-直線移動の再現性

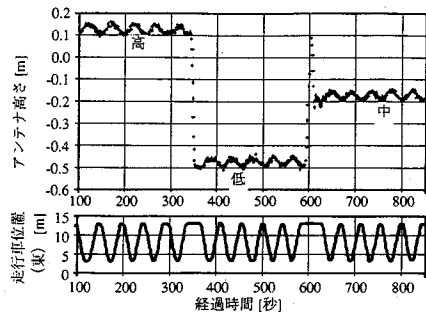


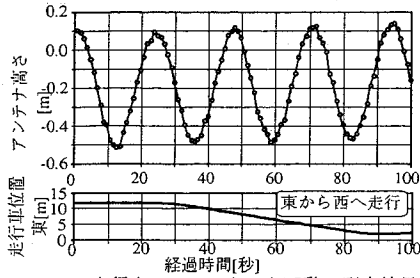
図-6 高さ測定精度実験結果

および(3)はそれぞれ停泊中および航行中の作業船の測量精度を、また、(4)および(5)は、それぞれ潮位変化および波浪などによる動揺を受けた場合の測量精度を確認するための基礎実験である。さらに、(6)は測量船の定められた測線上の航行や杭打ち船の定められた位置での作業に対する本システムの性能を調べるために行う実験である。

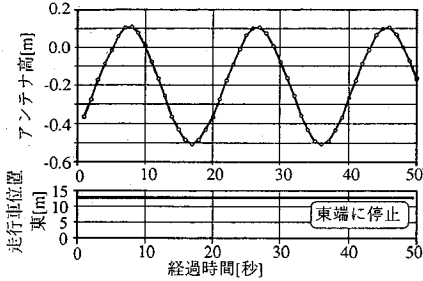
本実験では、関門海峡北九州市門司港側にある風師山に固定局を設定し、アンテナおよびデータ送信設備を設置した(図-3および写真-2参照)。また、移動局として、下関港側の海に面した平地(下関機械整備事務所構内)に写真-1に示した装置を配置した。

(1) 初期化機能の確認

2章で述べたように、本研究ではオンザフライ方式で初期化を行う。そこで、移動局側の受信環境、受信時刻、



(a) 走行中のアンテナの上下動の測定結果



(b) 停止中のアンテナの上下動の測定結果

図-7 アンテナ上下動追従実験結果

衛星配置などについて、異なる条件を設定して、初期化に要する時間を調べた。表-2にその結果を示す。表のなかで、移動中とは、アンテナを移動させながら初期化を行ったことを意味する。また成否の判定は、OTF初期化における解の候補の残差(2.(3)b参照)が25mm以下、かつ継続時間が10分以上であることを基準とした。初期化に要する時間は、移動局における観測状況、使用衛星数、ディファレンシャル方式による測量精度、マルチパス、基準局と移動局の距離などによって変動すると考えられるが、本実験においては初期化時間は4~15分であり、おおむね満足する結果が得られた。

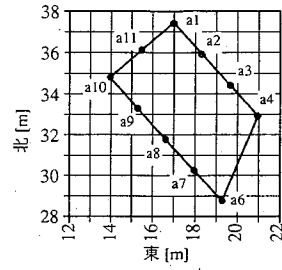
(2) 静止測量精度

移動局のアンテナを静止させ、観測時間を変えて移動局の静止状態における測量精度を調べた。図-4に基線長を約30mおよび3kmとした場合の測量結果を示す。同図には、固定局との相対的座標(平面)が示されている。南北方向および東西方向の座標の観測値の標準偏差は、基線長30mおよび3kmに対して、それぞれ、0.645cmおよび0.800cmであり、十分な精度を有していることが示された。

なお本観測の測定時間は1時間、サンプル数は3,600である。

(3) 移動測量精度

次に、移動局のアンテナを走行台車に搭載し、速度を0.25~1.00m/秒で適時変化させながら、直線レール



間隔	真値 [cm]	測定値 [cm]	誤差 [cm]
a1 - a2	200.0	199.8	-0.2
a2 - a3	200.0	200.3	+0.3
a3 - a4	200.5	199.5	-1.0
a6 - a7	201.0	201.4	+0.4
a7 - a8	200.0	199.8	-0.2
a8 - a9	200.0	200.7	+0.7
a9 - a10	200.0	200.0	0.0
a10 - a11	201.0	201.6	+0.6
a11 - a1	200.0	199.6	-0.4

図-8 地上描画トレース実験(1)測定結果

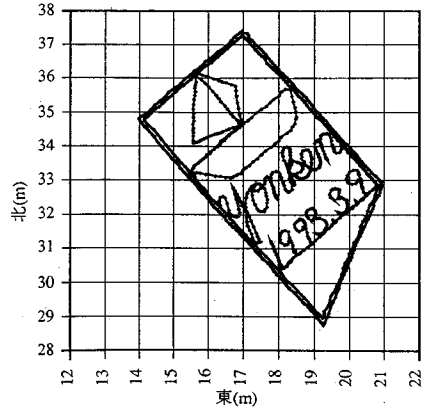


図-9 地上描画トレース実験(2)測定結果

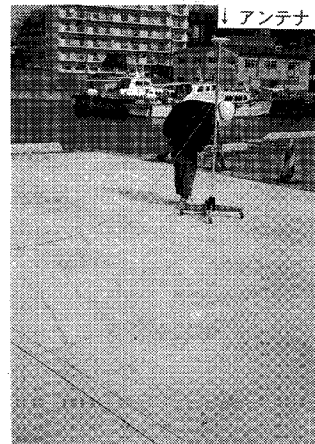


写真-3 地上描画のGPSによるトレース(図-9参照)

(長さ約13m)上を1時間往復走行させた。図-5(a)は走行軌跡の全体を、図-5(b)にその一部を拡大して示している。走行方向の直角方向(クロストラック)の標

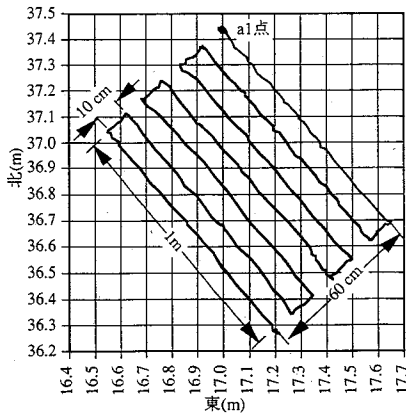


図-10 地上描画トレース実験(3)測定結果

準偏差は0.74cmであり、直線上の動きを十分な精度で観測していることが分かる。

(4) 高さ測定精度

高さの測定精度を調べるために、台車に搭載した移動局側のアンテナの高さを基準高さ(13.0cm)から0, -30, -60cmの3段階に変化させて実験を行った。台車の水平走行速度が1m/秒の場合の結果を図-6に示す。同図において、アンテナ高さと走行位置の測定結果に周期性が見られるが、これはアンテナが、台車の走行により高さ0.0m・東12.5mの位置と高さ0.03m・東3.0mの位置とを往復しているためである。アンテナ高さを13.0cm(高)、-53.0cm(低)および-23.0cm(中)に移動させた場合の観測値の平均をとると、いずれも正しい高さと±0.2cmの差に収まっていた。また、静止時の高さの標準偏差は0.94cmであった。なお本実験は数回実施しており、いずれも同様の結果が得られている。以上のように高さの測量精度も水平方向の精度とほぼ同等の値をとることが分かった。

(5) アンテナの上下運動に対する追従性

本システムを海上作業船に搭載し、たとえば海底面の深浅測量を行う場合、波浪による船体の動揺や船速に応じて変わるトリム変化(船体の前後の傾きの変化)を補正して測定水深を決定する必要がある。

船体動揺の補正については、周期15秒程度以下の短周期成分は加速度計によって補正できるが、15秒程度以上になると加速度計による補正は困難である。そのような問題点に対して、本システムを用いて高さ測定を行えば、上下運動の補正値が直接求められる利点がある。そこで、周期15秒以上に対する高さの変動に対して、本システムが正確に追従できるかどうかを調べるための実験を行った。

移動局のアンテナを、海面の上下運動をシミュレート

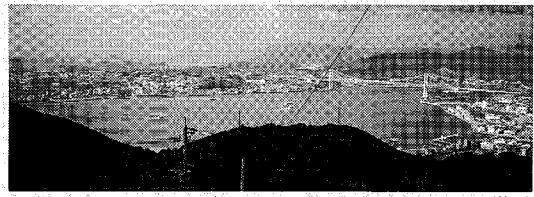


写真-4 海上実験場所(関門海峡、基準局から望む)



写真-5 実験に用いた測量船

表-3 オンザフライキャリブレーションの結果(測量船による実験)

状況	所要時間	成否	基準長(m)	使用した衛星番号
停泊中	5.0分	成功	115	11, 17, 18, 25, 28, 29
停泊中	7.0分	成功	115	11, 15, 18, 19, 27, 28
停泊中	4.0分	成功	115	2, 11, 14, 15, 19, 27, 28
停泊中	13.0分	成功	115	13, 16, 18, 19, 24, (26), 27
航行中	11.0分	成功	280	1, 12, 17, 20, 21, 23, 26
航行中	6.0分	成功	1,750	1, 12, 20, 21, 23, 25
航行中	15.0分	成功	450	1, 3, 20, 21, 25

()内の衛星番号は途中から使用した衛星を示す

する加振装置に取り付けて、アンテナに周期性の上下運動を与えて測量を行った。すなわち、前節の実験で用いた直線レール上を、振幅60cm、周期約20秒の定常上下運動を与えながら、水平速度25cm/秒でアンテナを走行させた。図-7にアンテナ高さの観測結果を示す。この図から本システムによって、アンテナに与えた正弦波が正確に検出され、この程度の船体の動きに本システムは追従できることが確認された。

(6) 地上描画のトレース実験

地上に描いた約4m×8mの台形図形を、移動局アンテナを搭載した台車でトレースし、さらに途中に設けた観測点座標を測定し、観測点間の距離を求め、その精度を調べた。観測点は2m間隔に10点設け(a1~a4, a6~a11)、各点で1分間測定し平均位置を求め観測点間の距離を求めた。トレースした結果および距離の測定値を図-8に示す。図形は正しくトレースされており、GPSによる測定値と真値(メジャーによる測定値)との差は±1cm以内であった。

さらに同台形図形内に筆記体の「Yonken」やヨットを描き、これに沿ってアンテナ台車でトレースし、その

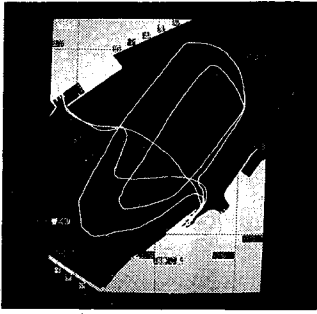


図-11 測量船航跡のリアルタイム表示 (カラーディスプレイ)

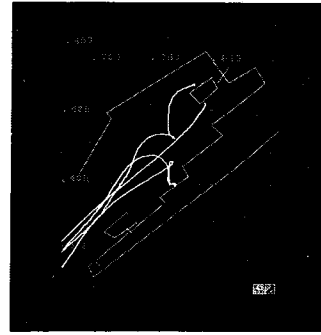


図-12 航跡の拡大表示

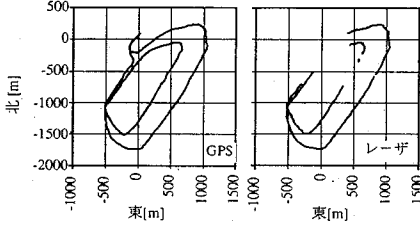


図-13 GPSとレーザ測距装置の航跡比較 (全体)

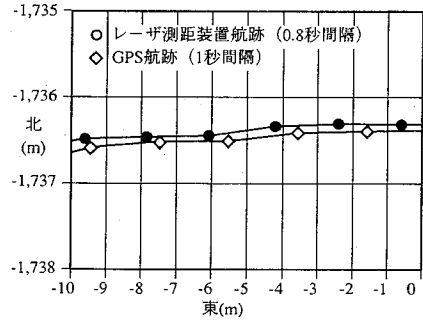


図-14 GPSとレーザ測距装置の航跡比較 (差が大きい部分)

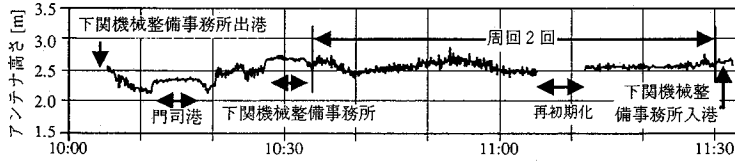
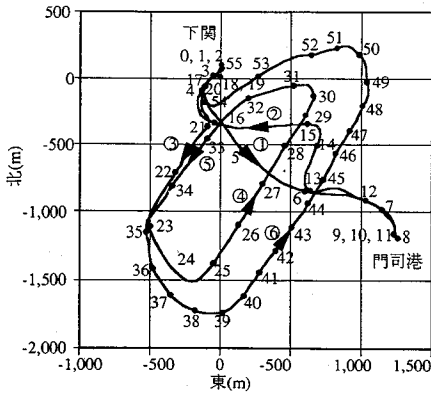


図-15 測量船のアンテナ高さのモニタリング結果



①から⑥: 運航経路
0~55: 10時00分からの経過時間×100秒

図-16 GPSによる航跡図

軌跡をモニタする実験を行った。アンテナ台車でトレースしている様子を写真-3に、また、GPSによって得られた軌跡を図-9に示す。さらに、長さ1mの直線7本を10cm間隔で描きそれをアンテナ台車でトレースした

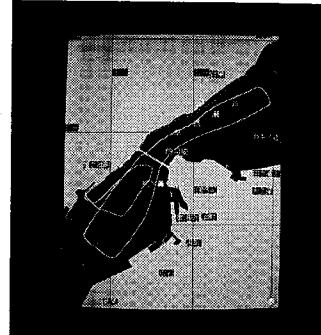


図-17 関門航路における測量船の航跡のリアルタイム表示

結果を図-10に示す。この図から本システムは10cmの間隔を明瞭に識別できる性能があることが示された。

本文で述べたほかに、観測中に受信衛星が切り替った時の誤差の補正精度、サイクルスリップ補正機能の確認などの実験を行ったが、いずれも満足のいく結果が得られた。

なお、上記実験全体を通じて6~7個の衛星が捕捉され、利用可能であった。またこの期間のPDOPは、最小

2.1, 最大3.18であり, 衛星条件は良好であった。

4. 海上における実証実験

3章に示した基礎実験の結果, 目標とした動作と精度がおおむね確認されたので, 本システムの海上における実用性を検証するために, 測量船を用いた現地実験を, 関門海峡関門橋付近(写真-4, 図-3参照)において行った。写真-5は実験に用いた本システムを装備した海上測量船である。

なお実験当日の海・気象条件は, 波浪; さざ波程度, 天候; 晴れ, 風; ほぼ無風, の状態であった。

まず最初に, 船上における初期化動作の確認を, 3.(1)と同様に行った。表-3にその実験結果を示す。船上においても, 初期化に要する時間は4~15分であり, おおむね目標どおりの動作を示すことが確認された。

次に, 下関港と門司港間を航行し, その間における航跡のモニタリング, および, 本システムで得られた航行軌跡とレーザ測距装置を用いて得た航跡との比較を行った。図-11に本システムによって, カラーディスプレイ上にリアルタイムに表示された測量船の航跡を示す。図-12は, 下関港内における航跡の拡大図である。このように, 測量結果をディスプレイ上で必要な縮尺にしたがって容易にズームングできる特徴がある。

図-13に, 本システムおよび自動追跡機能をもつレーザ測距装置を用いて, それぞれに得られた航跡を示す。ただし, 測量船位置を測定する時間間隔は, GPSを用いた本システムでは1秒, レーザ測距装置では0.8秒である。両者によって測定した航跡を詳細に比較した結果, それらはほとんど一致し, その差は大きい箇所でも約10cmであり(図-14参照), 実用上ほとんど差がないことが示された。また, レーザ測距装置による航跡は, 測量船の速度が大きかったため, 自動追尾ができなかった箇所があるが(図-13のレーザ測距装置による測量結果で軌跡が途切れている箇所), 本システムではそのような問題は生じなかった。

図-15は, 航行中の測量船の上下運動を観測した結果で, アンテナの高さを測定している。また, 図-16は図-15に示した測量船の上下動に対応した水平面内での航跡図であり, 10時00分から経過時間を併記している。測定中は概して下関港側(図-16における(E0.00, N0.00)付近)の方が門司港側(図-16における(E1250, N-1200)付近)より潮位が高く, また, 北東の潮位が南東の潮位よりも高い状態であった。

一方, GPSのアンテナは船尾側に取り付けられているため, 測量船が高速で航行すると船体が船尾トリム(船尾が船首に対して下がる状態)となるため, アンテナ部は停止時よりも低くなる。その影響は図-15に示す観測結

果に現れており, たとえば下関港を出港後, 高速かつ船尾トリムの状態で門司港に向かう間(10:03~10:13)は, アンテナの位置が低くなっている。門司港停泊時(10:13~10:18)には船尾トリムが解消されアンテナ位置が高くなる。また, 10時40分頃から10時52分頃にかけて測量船は高速で, 図-16において南西から北東方向へ航行しており, この間アンテナ高さが時間経過に対して直線的に増加していることが分かる。このような航行中の測量船の地上からの相対高さの観測は, 海流や潮位また船のロールとピッチ運動の影響を受けるため, 従来は計測が困難であった。したがって, 今回の観測値と比較すべき他のデータはないが, 本システムによって航行中の測量船の地上からの相対高さの測定の可能性が示されたものと考えられる。ただし, 測定結果の定量的な評価および船体動揺の具体的補正方法については今後の課題である。

最後に, 関門航路における航行実験に対する航跡表示の他の一例を図-17に示す。関門大橋の下を航行する際に衛星からの電波が遮られ, サイクルスリップを生じたが, 本システムの補正機構の働きで航跡にはほとんど乱れが生じないことがわかる。

5. 結論

本論文では, 海上作業船の位置測量を対象として開発したリアルタイムGPS測量システムについて, そのシステムの概要と動作確認の基礎実験, ならびに海上における実証実験の結果を述べた。本論文の結論は以下のように取りまとめられる。

- (1) 作業船測量のためのリアルタイムGPS測量システムを独自に開発した。このシステムはキネマティック方式に基づいており, 海上における広域でのリアルタイム測量の実現のために, 70MHz帯無線テレメータの導入, ハードおよびソフト両面の細部における技術開発等の独自の工夫を施したものである。
- (2) 本システムでは作業船測量における実用上の利便性を考え, 作業船の航行軌跡が港湾構造物の位置と共にカラーディスプレイ上にリアルタイムで表示されるものとした。
- (3) システムの動作確認のための基礎実験の結果, 移動局の座標は, リアルタイムで標準偏差が1cm内であることが確かめられた。また, 10cm間隔の直線の配列も明瞭に識別され, 開発の目標とした性能を十分に有していることが示された。
- (4) 海上における測量船による現地実験においても, 基礎実験と同程度の精度を有することが確認された。また, レーザ測距装置による測量結果と比較したところ, 航跡の差は10cm程度であり, 実用上十分な精度を有す

ることがわかった。

以上のことから、本研究で開発したシステムの、作業船の位置測量における実用化の可能性が検証されたものと思われる。

一方、実作業への適用を想定したとき、現行システムは、初期化性能の信頼性、適用範囲、受信機のノイズ対策等に関して必ずしも十分とは言えない面がある。今後より広範囲の港湾において確実に利用できるように、これらの点について改良することがこれからの課題である。

付録1 GPSによる測量方式の概要¹⁾⁻³⁾

ここでは、GPSによる測量方式について簡単に述べておく。GPS測量には大別して、1)単独測位、および、2)相対測位がある。

1) 単独測位

人工衛星から電波を受けた点の絶対座標(経緯度、高さ)をリアルタイムで求める測量方法である。複数の人工衛星から送られる電波の到達時間を観測し、さらに衛星から送られてくる衛星位置や時計誤差などの情報から受信点の位置を求めるものである。精度は一般に数10mである。

2) 相対測位

複数の観測点に受信機を設置し、基準点からの相対位置を求める測量方法である。これには、コード疑似距離(code pseudo range)を利用する方式と搬送波位相(carrier phase)を利用する方式とがある。

2-1) コード疑似距離を用いる方式

観測点座標を計算する方法は、基本的には単独測位と同じである。ただし、基準点の既知座標と単独測位の結果をもとに補正項を計算し、他の観測点にその補正値を伝送し、それを用いて観測点で得られた単独測位解を補正して測量精度を高める方式である。本文で述べたディファレンシャル方式は、この方法を用いたものである。精度は、一般に1m~10m程度である。

2-2) 搬送波位相を用いる方式

人工衛星から送られる電波の搬送波位相を積算し、その観測値に基づいて、観測点間の相対座標を高精度で求める方法である。これには次の2つの方式がある。

a) スタティック方式

複数の観測点にアンテナを固定して、それぞれの点において同時に少なくとも3個以上の人工衛星からの電波を受信し、観測点間の相対座標を求める方法である。観測時間は、衛星の個数および基線長によって異なるが、4衛星を同時受信できる場合、1~2時間程度を目安としている。

b) キネマティック方式

基準点にアンテナを固定し、もう一方のアンテナを受信電波が途切れないようにして、次々と観測点に移動させて、基準点と観測点との相対座標を求める方法である。なお、アンテナを移動させるにあたって、座標が既知である観測点から出発する、あるいはアンテナスワップという初期化動作を行うなどの必要がある。この方式においては、1観測点における観測時間は数秒~数分で良い。

観測と測位計算をオフラインで処理する場合、上記のa)、b)いずれの方式においても、受信データを一旦受信機内のメモリーに記憶させ、観測終了後、コンピュータに受信内容を転送し、解析によって観測点の座標を求める。精度は、一般に数mm~数cmである。

付録2 整数値バイアス¹²⁾

相対測位における測位計算では、人工衛星と二つの受信機との距離の差を求める。それには、受信機において積算された搬送波位相の積算値を用いるが、受信機は波数の小数以下の位相のみを測定するため、波数の整数部分は不確定となる。その不確定分を整数値バイアス(integer ambiguity)と呼んでいる。整数値バイアスが確定されなければ正確な位置が計算されない。

参考文献

- 1) 日本測地学会編著：新訂版GPS-人工衛星による精密測位システム-、(社)日本測量協会、1989。
- 2) Leick, A.: *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, 1990。
- 3) Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger and J. Collins: *Global Positioning System*, Springer-Verlag, 1992。
- 4) Lachapel, G., M. E. Cannon and G. Lu: Ambiguity Resolution On-the-Fly -A Comparison of P Code and High Performance C/A Code Receiver Technologies, *Proc. ION GPS-92*, New Mexico, the Institute of Navigation, pp. 1025-1032, 1992。
- 5) Burgess, J. F. and S. Frodge: Performance Testing of On-the-Fly GPS Technology, *ditto.*, pp.1071-1077, 1992。
- 6) 佐田達典、高田知典：リアルタイムキネマティックGPSを用いた誘導型測量システム、土木学会誌, Vol. 79, No. 2, pp. 18-20, 1994。
- 7) Hanson, P., P. Axelrad, T. Hayashi and T. Ishizaki: A Real-Time GPS Kinematic Survey System (GKSS), *Proc. ION GPS-92*, New Mexico, the Institute of Navigation, pp. 1005-1013, 1992。
- 8) Hayashi, T., Y. Nakazono, Y. Hanson and P. Axelrad: Test Results of Real Time GPS Kinematic Survey System (GKSS), *Proc. ION GPS-93*, Salt Lake City, the Institute of Navigation, 1993(in print)。
- 9) Rodgers, C. E.: Multipath Simulation Software Developed for the Design of a Low Multipath DGPS Antenna for the U.S. Coast Guard, *Proc. ION GPS-92*, New Mexico, the Institute of Navigation, pp. 43-50, 1992。

- 10) Tuji, H., K. Sugita, K. Nemoto, S. Mashiko, K. Goto, M.Iwata, M.Murakami, I. Otsu, S. Ishikawa and A. Tsuchiya: Results of Phase Characteristic Measurement of GPS Receiver Antenna, *Special Issue for The Global Positioning System(GPS)*, The Geodetic Society of Japan, July, pp. 231-244, 1993.
- 11) Ashjaee, J.: GPS doppler processing for precise positioning in dynamic applications, *GLOBAL POSITIONING SYSTEM*, papers published in NAVIGATION, Vol. III, reprinted by the Institute of Navigation, pp. 54-69, 1986.
- 12) 土屋淳, 辻宏道: やさしいGPS測量, 日本測量協会, 1991.

(1994.7.8 受付)

DEVELOPMENT OF A REAL TIME POSITIONING SYSTEM FOR WORKING VESSELS BY USING GPS

Kenji HAMADA, Takeshi ISHIZAKI, Hideo MIURA, Tadao HAYASHI,
Norikazu SHIMIZU and Koji NAKAGAWA

Surveying the position of working vessels is a fundamental task for constructing offshore structures, dredging sea bed, observing tide behavior, and managing port facilities. Therefore, a real time positioning system with high accuracy is needed in practical harbor works. The Global Positioning System (GPS) is a surveying system using artificial satellites.

GPS offers several advantages over conventional surveying methods. Three dimensional vectors of long baselines can be determined with high accuracy. Intervisibility between sites is unnecessary. Measurements can be taken during night and day, under varying weather conditions.

In this paper, a real time positioning system using GPS has been developed for surveying the position of working vessels. This system is based on the kinematic method of relative positioning. In order to verify the practical applicabilities of the system, field investigations were conducted. It could be concluded that the system is useful and effective for positioning working vessels.