GPSによる3次元精密速度情報と評価実験

辰己 公朗*・河口 信義**・久保田 崇***・新井 康夫****

3-D Precise Velocity Information by GPS and Evaluation Test

Kimio TATSUMI, Nobuyoshi KOUGUCHI,

Takashi KUBOTA and Yasuo ARAI

Abstract

The purpose of our study is to evaluate the adaptation of Velocity Information by GPS (VI-GPS) to docking and anchoring. This evaluation is to prove that the effectiveness of VI-GPS is the same or even higher compared to the Speed and Distance Measurement Equipment (SDME) in docking and anchoring. The experiments to survey the static and dynamic performances of velocity information by Kinematic GPS (K-GPS) and VI-GPS were carried out on land, while the experiments to survey 3-D velocities of large vessel such as ferryboat and small vessel such as training ship were carried out onboard. Consequently from these experimental results, it was shown that VI-GPS is going to be a good instrument offering navigator better velocity information than the conventional SDME and/or K-GPS.

Keywords : SDME, precise velocity, VI-GPS, K-GPS

キーワード: 船速距離計, 精密速度, VI-GPS, K-GPS

1. はじめに

一般の船舶が航行中に速度情報を得るためには、収集機器の特性に応じて速度情報収集のために様々な機器が用いられている。通常航行時には対水速度が得られる電磁ログ、水深により対水または対地速度が得られるドップラーログ、常時比較的精度良く対地速度が求まる GPS が主として用いられている。

1970 年代の後半から、VLCC などの巨大船では離着岸時に 2 軸（前後左右方向軸）もしくは 3 軸（前後方向軸および船首・船尾における左右方向軸）の対地速度を高精度（1cm/s 程度）で計測するためにドップラーソナーを SDME（Speed and Distance Measurement Equipment）として用いている⁽¹⁾。2000 年 SOLAS においては、総トン数 50,000GT 以上の船舶には 2 軸 SDME の装備が勧告された⁽²⁾。また、タンカーなどの大型船が離着岸する場合、ドルフィン側に船速距離計（Docking SDME）が設置されており、

その船速距離計として水中超音波の音波障害を避けるためにレーザー方式が良く利用されるようになってきた。しかしながら、50,000GT 未満の船舶では SDME が高価で設置場所に制約があることから、離着岸時における速度情報の収集手段として目視を主たる手段として用いている。離着岸時などの低速時に船舶が移動する時には、目視により精度良い速度情報を収集するために、航海者は重視線などを用いて目標の位置の変位を比較的長い時間凝視する必要がある、その間視覚から得られる情報が限定あるいは遮断され、航海者が他の必要とされる情報を収集できないために安全運航が阻害されるであろう。そこで、離着岸などの船舶が低速航行する時に、航海者が必要とする精密な速度情報を瞬時に提供可能であれば、船舶の安全運航に大きく寄与できよう。

著者らは前報において、離着岸を安全に実行する時に必要な速力情報要件を明らかにし、航海者が必

* 正会員 広島商船高等専門学校（〒725-0231 広島県豊田郡大崎上島町 4272-1）tatsumi@hiroshima-cmt.ac.jp

** 正会員 神戸大学大学院 海事科学研究科（〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1）

*** 正会員 大島商船高等専門学校（〒742-2193 山口県大島郡周防大島町大字小松 1091-1）kubota@oshima-k.ac.jp

**** 正会員 海技大学校（〒659-0026 兵庫県芦屋市西蔵町 12-24）arai@mail.mtc.ac.jp

要としている速力に関する情報基準が現規則とどの程度整合しているか調査することを目的としたアンケート調査を行なった。そして、その結果から現場の実務者がより安全に実務を実行するためには、精度のみではなく応答性や信頼性を含め包括的かつ定量的に信頼性を評価することが要求されており、さらに高精度で高信頼な速力情報を提供できるシステムを考える必要が有ることを述べた⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで、本研究は設置場所に制約が少なくかつ安価な GPS による精密な速度情報を用いて、離着岸時などの船舶が低速航行する時に精密な速度情報を瞬時に航海者に提供し、航海者の安全運航に寄与することを目的とする。

本論文は初めに GPS を用いて精密速度を計測する手法である VI-GPS および K-GPS による速度計測手法を説明する。次に、VI-GPS の速度情報精度を評価するために実施した陸上および海上における実験の概要と結果を述べる。陸上における実験は、矩形の 4 方位をそれぞれ一定速度で直線移動させる実験、ステップ状に近い加速度を加える実験、円周上を一定速度で移動させる 3 つの実験とした⁽⁵⁾。海上における実験は、1 つは 30 分弱の短時間で低速度の大型フェリー着岸時における速度計測実験と、8 時間程度の比較的長時間瀬戸内海を航行する小型練習船の速度情報およびその取得率などを計測する 2 つの実験とした。陸上および海上における実験結果から、通常および低速航行時のどちらにおいても VI-GPS による速度情報が、現在利用されている船速距離計と比べて精密な速度情報となることを以下に述べる。

2. 速度計測法

ここで用いる速度情報は、GPS 衛星信号のエポック間の搬送波位相変位による 3 次元精密速度情報 (VI-GPS: Velocity Information by GPS) を計測する手法である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。また、速度の精度を比較するために用いる K-GPS も搬送波位相計測を用いることから、GPS 搬送波位相計測のための観測方程式を以下に示す。

$$\lambda\Phi = \rho + c \cdot (dt - dT) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_{\Phi} \quad (1)$$

ここで、 Φ は搬送波位相の観測値、 ρ は衛星と受信機の幾何学的距離、 c は自由空間上の光速、 dt および dT は受信機と衛星のそれぞれの時計誤差、 λ は波長、 N は整数、 d_{ion} および d_{trop} は電離層および対流圏の遅延、 ε_{Φ} は受信機雑音とマルチパス誤差である。そこで、(1)式を基にして、VI-GPS および K-GPS に

よる速度計測手法をそれぞれ述べる。また、3 章および 4 章の実験に用いた装置は、受信機は Furuno GS-80、アンテナ Furuno GP-001 であり、処理は後処理とし、記録したデータ形式はバイナリー形式 Furuno フォーマットとした。

2.1 VI-GPS による速度計測

VI-GPS は現時点における移動体速度を求めるために、1 時点前のエポック $k-1$ における搬送波位相と 1 時点後のエポック $k+1$ における搬送波位相の時間差分である搬送波位相時間変位量を計測し、このエポック間における搬送波位相時間変位量が周波数変調で良く知られている瞬時周波数⁽⁸⁾となることから、この瞬時周波数の時間変位を移動体速度成分に相当するドップラー周波数変位量と近似的に用いる。そこで 4 つ以上の GPS 衛星から送信されたエポック間搬送波位相変位量を計測することで、移動体の精密速度 3 次元成分と受信機時計誤差が求まる。

そこで、(1)式の搬送波位相観測方程式におけるエポック間の搬送波位相時間差分を求め、エポック間の観測時間間隔が短時間 (1 秒間) であることから、電離層や対流圏伝搬遅延に伴う誤差変動が無視できる程度に小さいと仮定でき、 δ を差分演算子とすると搬送波位相時間差分は次式となる。

$$\lambda\delta\Phi = \delta\rho + c \cdot (\delta dt - \delta dT) + \varepsilon_{\Phi} \quad (2)$$

次に、(2)式における $\lambda\delta\Phi$ を 1 時点前のエポック $k-1$ における搬送波位相と 1 時点後のエポック $k+1$ における搬送波位相の時間差分を計測することで、次式による離散近似値として得る。

$$\lambda\delta\Phi_k^j \approx \frac{\lambda\Phi_{k+\delta}^j - \lambda\Phi_{k-\delta}^j}{2 \cdot \delta} \quad (3)$$

ここで、 Φ は衛星信号の搬送波位相計測値、添字 j は衛星番号、 k は観測エポック番号、 δ はエポック時間間隔をそれぞれ示す。(3)式において、現時点の前後のエポックにおける計測値を求めているのは、移動平均により現時点における速度の精度を向上させることを目的とする。また、計測におけるサンプリング周波数は 5Hz であるが、(3)式における差分は移動平均処理により 1 秒間隔で得ている。

さらに、ここから移動体の精密速度 3 次元成分を求める計算アルゴリズムは搬送波位相による位置計測アルゴリズムと同様のアルゴリズムを用いる。

2.2 K-GPS による速度計測

VI-GPS を用いて計測した速度情報の精度を比較検討するため、高精度で移動体の位置計測が可能なが良く知られている移動体の精密速度 3 次元成分キネマティック GPS (K-GPS: Kinematic GPS) の位置変位の時間差分から得られる速度を用いる。そこで、(1)式の二重差分法を行うことで K-GPS 観測方程式を以下に示す⁽⁹⁾。

$$\lambda \Delta \nabla \Phi = \Delta \nabla \rho + \Delta \nabla d_{\rho} + \Delta \nabla \lambda N - \Delta \nabla d_{ion} + \Delta \nabla d_{trop} + \varepsilon_{\Delta \nabla \Phi} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta \nabla$ は二重差分演算とする。K-GPS による移動体の精密位置計測は二重差分をとるためにリファレンス局として陸上の固定点に設置した GPS 受信機を必要とし、移動体とリファレンス局間の距離が約 20km 程度以内に限定される場合において、軌道、電離層および大気圏の二重差分誤差である $\Delta \nabla d_{\rho}$ 、 $\Delta \nabla d_{ion}$ および $\Delta \nabla d_{trop}$ が無視できる程度に小さくなることは良く知られていることから、この距離制限内で(4)式は次式となる⁽¹⁰⁾。

$$\lambda \Delta \nabla \Phi = \Delta \nabla \rho + \Delta \nabla \lambda N + \varepsilon_{\Delta \nabla \Phi} \quad (5)$$

そこで、K-GPS によるリファレンス局から移動体までの 3 次元相対測位がサブセンチメートル精度で計測可能となる。次に、K-GPS により計測された移動体上アンテナ位置の時間差分を行なうことで、次式により速度を求める。

$$\mathbf{V} \approx \delta \mathbf{P} = \frac{\mathbf{P}_{rover}^{k+\delta t} - \mathbf{P}_{rover}^{k-\delta t}}{2 \cdot \delta t} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{P}$ は K-GPS により計測した 3 次元位置、添え字上段の $k+\delta t$ は k 時点より δt だけ後の時刻を示し、 $k-\delta t$ は k 時点より δt だけ前の時刻を示す。ただし、K-GPS による位置計測のサンプリング周波数は 5Hz であるが、VI-GPS と同じ条件で速度の精度を比較するために 1 秒間の移動平均を用いて速度を算出する。

3. 陸上における実験

3.1 実験概要

陸上における実験は、2006 年 7 月 24 日および 25 日に神戸大学大学院海事科学研究科 2 号館屋上で行った。1 つの GPS アンテナをリファレンス局として屋上に固定し、もう 1 つの GPS アンテナを移動局と

して位置 $\pm 0.01\text{mm}$ および加速度 0.3G で制御可能な FA 用 3 次元アクチュエーターに取り付けた。陸上における実験は 3 種類の実験を行なった。図 1 に、以下に述べる第 1～3 の陸上実験設備を示す。

Fig.1 Photo of land experiment

第 1 の実験は直線等速度実験で、一辺 70cm の正方形の外周 (方位を 15 度ずらした 24 方位) を異なる 3 つの速度 (1, 5, 10 cm/s) で、等速移動させた。ただし、各コーナーで一時的に停止させ、各実験時間は約 300 秒、サンプリング周波数は 5Hz とした。第 2 の実験は加速度実験で、GPS アンテナが静止した状態から 0.3G の加速度にて 10cm/s の速度まで直線的に加速するステップ応答とした。第 3 の実験は等速円運動実験で、直径 70cm の円周上を 20cm/s の等速度で移動させ、直交する X および Y 軸方向における速度変化に対する計測精度を 3600 秒の比較的長時間の計測を実施した⁽³⁾⁽⁴⁾。

3.2 直線等速度実験

表 1 に 1cm/s で GPS アンテナを方形の各辺を移動させた場合の結果を表す。上段の方位は方形の最初の辺の方向で、0 度は方形の四辺が 0、90、180、270 度に向けて 1cm/s の速度で移動させたことを示す。また、VI-GPS および K-GPS の上段はその四方位に移動した平均速度、下段は標準偏差を表し、それぞれの括弧内の数字は 1cm/s からの誤差量をパーセント誤差 (=速度誤差/移動速度×100) で示す。

表 1 の結果から、VI-GPS による平均速度の誤差は、最大で 0.06cm/s 以下であり、標準偏差は 0.3cm/s 以下であった。一方、K-GPS の結果は平均速度および標準偏差にどちらも VI-GPS の結果より誤差が大きいがわかる。

(6)式より K-GPS による速度計測は、連続的な 2 つの K-GPS 位置の差分により算出している。K-GPS による位置誤差を零平均で標準偏差 σ_K のガウス確率過程⁽¹¹⁾⁽¹²⁾に従うと仮定すると、K-GPS による速度計測誤差は、零平均で標準偏差 $\sqrt{2}\sigma_K$ のガウス確率過

程となる。一方、VI-GPS による速度計測誤差はドップラースhift量から直接速度計測を行なっていることから零平均で標準偏差 σ_V のガウス確率過程となる。VI-GPS による速度計測誤差の標準偏差 σ_V は搬送波位相による位置計測と同様の計算手法を用いており K-GPS などの搬送波位相を用いた位置計測誤差と同等の標準偏差を有すると考えられることから σ_K と σ_V は同じ値を有する。VI-GPS に 6 つの全方向 (0, 15, 30, 45, 60, 75 度) の標準偏差はガウス確率過程に従うことから次式により

$$\sigma_{all} = \sqrt{\frac{\sigma_0^2 + \sigma_{15}^2 + \sigma_{30}^2 + \sigma_{45}^2 + \sigma_{60}^2 + \sigma_{75}^2}{6}} \quad (7)$$

0.26 cm/s となるが、K-GPS による 6 方向の標準偏差は同様の計算を行ない 0.34 cm/s であった。K-GPS による速度誤差の標準偏差は、VI-GPS による速度誤差の標準偏差の約 1.31 倍であった。これは理論値の $\sqrt{2}$ ($=1.41$) 倍に近い値を示していることから、VI-GPS による速度計測は K-GPS による計測と比べて理論的には $\sqrt{2}$ 倍精度良く計測が可能であることが考えられる。

次に表 2 に 5cm/s、表 3 に 10cm/s の一定速度で方形の外周を移動させた結果を表す。1cm/s、5cm/s、10cm/s の 3 つの速度の結果から、平均速度のパーセント誤差が 6%以下を維持している。また、全速度における VI-GPS の標準偏差は 1.03cm/s 以下であり、特に 5 cm/s より低速時の標準偏差が 0.5cm/s 以下を維持できている。そこで、現在でも巨大船などの離着岸時に 1cm/s 程度の高精度な速度計測が行われていることから、VI-GPS による速度計測は船舶の着岸や投錨の低速時に K-GPS による速度情報と同等あるいはそれ以上に高い精度で速度情報を航海者に提供できると考えられる。

Table 1. Experimental results of square test results between VI-GPS and K-GPS

		Set speed 1 cm/s					
Initial direction (deg.)		0	15	30	45	60	75
VI-GPS	Av	1.06 (6)	1.00 (0)	1.01 (1)	1.01 (1)	1.02 (2)	0.99 (1)
	σ	0.30 (30)	0.26 (26)	0.23 (23)	0.24 (24)	0.25 (25)	0.27 (27)
K-GPS	Av	1.10 (10)	1.06 (6)	1.07 (7)	1.06 (6)	1.07 (7)	0.81 (19)
	σ	0.39 (39)	0.31 (31)	0.35 (35)	0.34 (34)	0.25 (25)	0.37 (37)

The value in parentheses means percentage error.

Table 2. Experimental results of square test by VI-GPS

		Set speed 5 cm/s					
Initial direction (deg.)		0	15	30	45	60	75
VI-GPS	Av.	4.92 (2)	4.90 (2)	4.94 (1)	4.88 (2)	4.92 (2)	4.89 (2)
	σ	0.47 (9)	0.42 (8)	0.45 (9)	0.61 (12)	0.51 (10)	0.67 (13)

The value in parentheses means percentage error.

Table 3. Experimental results of square test by VI-GPS

		Set speed 10 cm/s					
Initial direction (deg.)		0	15	30	45	60	75
VI-GPS	Av.	9.63 (4)	9.67 (3)	9.67 (3)	9.64 (4)	9.68 (3)	9.66 (3)
	σ	1.03 (10)	0.92 (9)	0.95 (10)	0.96 (10)	0.96 (10)	0.98 (10)

The value in parentheses means percentage error.

3.3 加速度実験

加速度実験は GPS アンテナを静止した状態から一定の加速度で 10cm/s まで直線的に加速するステップ応答に近い動的な実験を実施とした。最初、FA 用 3 次元アクチュエーターにより、GPS アンテナを停止させた状態から、0.3G の加速度で動かし 10 cm/s の一定速度で移動させた。

図 2 に K-GPS と VI-GPS による実験結果を示す。ただし、同図中の灰色の太線は GPS アンテナの FA 用アクチュエーターにより制御した速度変位 (0.2s 間で 0m/s から 10cm/s に変化した)、灰色の細線は 5Hz で求めた K-GPS による速度 (K-GPS:0.2s)、黒の細線は測定時と 1s 秒前のエポックの計測位置の変位から測定時の速度を求める 1 秒間の移動平均処理を行った。K-GPS による速度 (K-GPS:1s)、黒の太線は VI-GPS による速度をそれぞれ示す。これらの結果から、K-GPS:0.2 秒による結果はアクチュエーターの加速度に対して時間遅れを生じていないが計測速度の変動が大きい。また、この計測結果にはオーバーシュート現象が見られたが、GPS アンテナはアクチュエーターに長さ 20cm 程度の棒で固定しており、この棒が加速度により振動していることから、この現象について本実験から評価することは困難である。K-GPS:1 秒と VI-GPS による計測速度変位は計測の平滑化による約 1 秒程度の時間の遅れがあるが、平滑化によって安定した計測結果を示している。そこで、現在でも巨大船などの離着岸時に 1cm/s 程度の高精度な速度計測が行われていることや、上記結果から船舶の着岸や投錨の低速時に 1 秒

程度の時間遅れを生じるが追従性の良い高精度な速度情報を航海者に提供できると考えられる。

Fig.2 Dynamic characteristics of velocity information by VI-GPS and K-GPS

3.4 等速円運動実験

等速円運動実験は半径 70cm の円周上を 20cm/s の等速にて移動させて、3600 秒の計測を行なった。この実験では円運動を X、Y の直交軸に分解することで 0cm/s から 20cm/s まで正弦的に変化する速度を比較的長時間調べた。図 3 に VI-GPS の等速円運動実験結果の一例を示す。同図より、X と Y 軸における速度変化は 0 から 20 cm/s 間で正弦的に変化していることがわかる。

さらに 3600 秒間には衛星の配置が変化し、それに伴って PDOP も変化している。そこで、PDOP を 2 未満、2 以上で 3 未満、3 以上の 3 段階に分けて、それぞれの PDOP の時に VI-GPS による 2 次元速度情報の誤差として 20cm/s からのズレ量を表 4 に表す。同表の結果から、計測速度の平均値は 0.2cm/s のズレで、標準偏差は 0.71cm/s 以下であった。そこで、長時間計測した結果、一般的に GPS 位置計測精度が良いとされる 3 未満の PDOP を確保できれば安定した速度情報の正弦的变化が見られることから、追従性の良い高精度で安定した速度情報を航海者に提供できると考えられる。

Fig.3 Result of circle test

Table 4. Relation between VI-GPS speed and PDOP results of circle test

JULY 26 th		PDOP<2	2≤PDOP<3	3≤PDOP
PDOP	Av.	1.92	2.73	3.11
Speed (cm/s)	Av.	19.8 (1)	19.8 (1)	19.8 (1)
	Σ	0.44 (2)	0.38 (2)	0.38 (2)
JULY 27 th		PDOP<2	2≤PDOP<3	3≤PDOP
PDOP	Av.	1.90	2.77	3.11
Speed (cm/s)	Av.	19.8 (1)	19.8 (1)	19.8 (1)
	Σ	0.71 (4)	0.41 (2)	0.37 (2)

The value in parentheses means percentage error.

4. 海上における実験

海上実験は、大型のフェリーおよび小型の練習船により、それぞれ行った。大型フェリーによる実験は低速時における VI-GPS により計測された速度を K-GPS による速度と比較することで低速時の速度精度の評価を調べ、小型練習船による実験は一定速度航行時と停泊時別に PDOP および速度情報取得率などを調査した。

4.1 実験概要

大型フェリーによる実験は、2007 年 9 月 17 日に鹿児島県志布志港のフェリー専用岸壁に入港するダイヤモンドフェリー“さんふらわあ きりしま”(総トン数: 12,418GT、全長: 186m) 上にて実施した。図 4 に実験を実施した海域における岸壁およびフェリー入港の航跡を示す。図中の船形は等時間間隔で示す航跡で、南から入港するフェリーが徐々に減速し、回頭の後に船尾より着岸の様子がわかる。K-GPS による速度と比較するために、リファレンス局を停泊位置から約 3km 離れた岬に設置し、本実験で用いた速度はリファレンス局から最大距離は 7km 以内であった。2 つの GPS アンテナは志布志港に入港するフェリーに取り付けた。図 5 にフェリーの船首と船尾にそれぞれ設置したアンテナ位置を示す。

Fig.4 Experimental area overview

Fig.5 Ferryboat and two GPS antennas

実験期間は入港時の機関のスタンバイから係留までの約 27 分、サンプリング周波数 5 Hz で計測データ数は 8,000 であった。それぞれの GPS 受信機では 7 個の同じ衛星の GPS 信号を用いた。また、K-GPS と VI-GPS によって得られる速度情報は比較するため 1 秒間で平均した計測値を用い、K-GPS による速度を基準値とし、VI-GPS 速度誤差は VI-GPS による計測速度から K-GPS による計測速度を引いた値を用いた。

小型練習船による実験は 2007 年 9 月 26 日から 28 日の間、海技大学校練習船“海技丸”（総トン数：157GT、全長：38m）の船上に GPS 受信機を 1 台設置し、この間に航行した瀬戸内海において 3 日間の航行中と停泊中において、VI-GPS による速度計測を行った。

4.2 大型フェリーによる実験結果

図 6-1～6-6 に船首および船尾における VI-GPS によって計測された水平速度成分（南北方向、東西方向）および垂直速度成分の速度およびその誤差を示す。上図は測定した速度を m/s、下図は速度誤差を cm/s で表す。さらに、表 5 に VI-GPS の水平方向、垂直方向および 3 次元方向の速度誤差の統計値を表す。これらの結果から、VI-GPS により計測された速度の平均のズレが最大なのは垂直方向で -0.07 cm/s、また、誤差の標準偏差が最大なのは、3 次元方向で 1.40 cm/s であった。このことから、K-GPS との差が小さく、K-GPS と同等の精度が得られることが確認された。

Fig. 6-1 VI-GPS E-W velocity and error (Bow-side)

Fig. 6-2 VI-GPS E-W velocity and error (Stern-side)

Fig. 6-3 VI-GPS N-S velocity and error (Bow-side)

Fig. 6-4 VI-GPS N-S velocity and error (Stern-side)

Fig. 6-5 VI-GPS heave velocity and error (Bow-side)

Fig. 6-6 VI-GPS heave velocity and error (Stern-side)

Table 5. Velocity error of bow and stern side

		Horizontal	Vertical	3-D
Bow-side (cm/s)	Av.	0.00	-0.06	-0.02
	σ	0.56	1.28	1.40
Stern-side (cm/s)	Av.	0.00	-0.07	-0.02
	σ	0.52	1.22	1.32

また、図 6-1～6-6 における速度誤差は時間の経過とともに増加している。そこで、その原因を調べるために計測時間の PDOP を求め、3 次元速度誤差の標準偏差と PDOP の関係および回帰直線を図 7 に示す。同図より、3 次元速度誤差の標準偏差と PDOP の間には明らかに相関関係が見られ、相関係数も 0.87 であった。そこで、PDOP と VI-GPS による 3 次元速度計測誤差の標準偏差との回帰式が次式で与えられる。

$$\sigma_{3D} = 0.18 \times (\text{PDOP}) + 0.03 \quad (8)$$

このように VI-GPS による水平および 3 次元速度を海上の大型フェリー入港時に計測した結果から、海上においても高精度で安定した速度情報を航海者に提供できると考えられる。

Fig. 7 Relation between 3-D velocity error and PDOP

4.3 小型練習船による実験結果

2007 年 9 月 26 日から 28 日の間、総トン数 157GT、全長 38m の海技大学校練習船“海技丸”の小型船の船上に 1 台の GPS 受信機を設置し VI-GPS による速度、PDOP、観測衛星数などの計測を行なった。

実験中の航海は、1 日目には神戸港を出航後、明石海峡航路、播磨灘航路を経て内海湾錨泊、2 日目は内海湾抜錨後に備讃瀬戸東航路を西航し、備讃瀬戸航路、燧灘、備讃瀬戸南航路、高松港停泊、3 日目は高松港出港後、備讃瀬戸東航路、播磨灘、明石海峡を経て神戸港入港であった。また、この間、1 日目は出航後直ちに阪神高速湾岸線の高架をくぐり、明石大橋を通過した、2 日目は瀬戸大橋を西航および東航で各 1 回、3 日目は明石大橋および阪神高速湾岸線高架で合計 6 回架橋下航行を行なった。この間、データ収集は約 53 時間 (3204 分)、その内航行中は約 25 時間で、停泊中は約 28 時間であった。

表 6 に小型練習船における実験の結果を表す。ただし、表中のデータ取得率は PDOP が 6 以下で正常な受信状態において取得されたデータの全データに対する割合である。

Table 6. Experimental results of training ship Kaigimaru

	Observation time (min)	Data acquisition rate (%)	PDOP			Number of satellite		
			Max	Min	Av.	Max	Min	Av.
Under way	1495.77	99.9	45.3	1.5	2.5	11	4	7.6
In harbor	1708.11	98.7	37.2	1.6	2.7	11	4	7.1

この結果から、航行中は 99.9%、停泊中は 98.7% の高信頼のデータ取得率であることがわかる。航行中にデータが取得出来ていない箇所は計 6 回の架橋

下航行時であることが考えられる。そこで、1 日目に明石架橋下を航行した時に計測した速度、PDOP および使用衛星個数の変動を図 8 に示す。

Fig.8 Experimental results under Akashi Bridge

図 8 より、明らかに明石架橋下航行時には衛星個数が低下すると同時に PDOP が大きくなり、4 衛星以下になる時間では速度計測が出来ておらず、この計測不可能である時間帯は約 40 秒間 (PDOP>6 とデータ未取得の時間の合計) で、この間は IMU (Inertia Measurement Unit) など他の装置を用いて補完を行なう必要がある。

しかしながら、航行中は架橋下航行時以外ではほぼ 99.9% のデータ取得率を示していることから港湾付近の海域においても VI-GPS による速度情報を高信頼に取得することができる。ただし、架橋下などを航行する場合あるいは停泊時におけるデータ取得率は 100% ではなく、何らかの事由によって GPS 衛星からの信号を受信機で受信できない状況が発生しており、これに対処するためには、常時 GPS 衛星状態の監視、また他の装置を用いるなど速度情報の冗長性の付加手段を考える必要がある。

5. まとめ

K-GPS はサブセンチメートルの高精度な位置測定が可能であるが、陸上のリファレンス局からの補正データを必要とし、高精度測位を実施するためには計測可能範囲が陸上から 20km 以内に制限される。そこで、測定可能距離の制限が無く、安価で高精度な速度計測システムとして VI-GPS による速度情報を用い、これによる速度精度評価を陸上および海上において実施した。これらの結果として

(陸上における実験より)

- (1) 等速直線実験による実験結果から、VI-GPS による速度平均値のパーセント誤差は 6% 以下、標準偏差は 1.03cm/s 以下であり、K-GPS による速度計測と同様に 1cm/s 程度の高精度な速度計測が可能である。
- (2) 加速度実験による実験結果から、0.3G 程度の加速度では VI-GPS による計測速度変位は計測の平滑化による約 1 秒程度の時間の遅れは生じるが、安定した速度計測が可能で応答性は K-GPS と同等であった。
- (3) 等速円運動による長時間計測実験結果から、通常の PDOP が確保できれば、安定した速度情報を得ることが可能である。

(海上における実験より)

- (4) 大型フェリー実験による実験結果から、VI-GPS の 3 次元速度情報は、平均のズレが -0.02 cm/s 、標準偏差で 1.40 cm/s であり、K-GPS による 3 次元速度情報との差が小さく、精度が良いことが確認された。
- (5) 小型練習船による実験結果から、VI-GPS は航行中 99.9%、停泊中に 98.7% の速度情報取得率のデータ取得率であり、高信頼に取得することができた。ただし、特に架橋下などを航行する場合などは他の補正手段を用いる必要がある。

以上の実験結果から、本手法 VI-GPS が船舶航行時に K-GPS と同程度あるいはそれ以上に精密な精度で速度情報の収集が可能であり、現在でも巨大船などの離着岸時に 1cm/s 程度の高精度な速度計測が行われていることから、離着岸時などの船舶が低速航行する時に精密な速度情報を瞬時に航海者に提供できることがわかった。ただし、架橋下などを航行する場合あるいは停泊時におけるデータ取得率は完全ではなく、何らかの事由によって GPS 衛星からの信号を受信機で受信できない状況が発生しており、今後はこれら速度情報取得の完結性を確保するための手法として、常時 GPS 衛星状態の監視および速度情報の冗長性を付加するための手段を考える必要がある。

謝辞

海上実験に関して、株式会社ダイヤモンドフェリー“さんふらわあ きりしま”、海技大学校練習船“海技丸”の両船長以下乗組員の皆様、海技大学校奥田教授にご協力をいただきました。また、古野電気株式

会社井潤氏、神戸大学大学院海事科学研究科航海計器学研究室井川氏ほかの皆様には陸上および海上における実験ならびにデータ解析でご協力いただきました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Supervision of Maritime Bureau, Ministry of Land Infrastructure and Transport : International Convention for the Safety of Life at Sea, 2000, 海文堂, 2002 年 6 月.
- (2) IMO Resolution MSC. 96(72) : Adoption of amendment to performance standards for devices to indicate speed and distance, May 2000.
- (3) K. Tatsumi, H. Fujii, T. Kubota, S. Okuda, Y Arai, N.Kouguchi and K. Yamada (2006). Performance Requirements of Ship's Speed in Docking / Anchoring Maneuvering, Proceedings of International Association Institute of Navigation IAIN 2006, Cheju South Korea.
- (4) 辰己公朗・久保田崇・藤井英信・河口信義・新井康夫: アンケート調査に基づく船舶離着岸時における速力情報に関する研究, 日本航海学会論文集, Vol.118, pp.31-38, 2008.
- (5) Y. Yoo, D. Hou, M. Hamada, Y. Nakama and N. Kouguchi (2006). Experimental Results of Ship's Maneuvering Test Using GPS, The Proceedings of the 2006 Asia Navigation Conference, Proceedings CD.
- (6) N. Kouguchi, Y. Arai, H. Fujii, T. Kubota, S. Okuda, K. Tatsumi and K. Itani: Velocity Information for Passing Narrow Channel and Docking/Anchoring Maneuvering, Proceedings of International Symposium Information on Ships ISIS 2006, Hamburg Germany, 2006, CD, pp.12.
- (7) D. Hou, Y. Yoo, N. Kouguchi and K. Itani (2005). GPS Position Using Velocity Integration Method, The Proceedings of the 2005 Asia Navigation Conference, Proceedings, CD.
- (8) 関英男監修, S.スタイン, J.J.ジョーンズ: 現代の通信回線理論, 森北出版, pp.160-162, 1976.
- (9) B.ホフマン, H.リヒテネガー, J.コリンズ: GPS 理論と応用, シュプリンガー・フェアラーク東京, pp.217, 2006.
- (10) B.ホフマン, H.リヒテネガー, J.コリンズ: GPS 理論と応用, シュプリンガー・フェアラーク東京, pp.220, 2006.
- (11) W. B. Davenport and W. L. Root (1958). An

Introduction to the Theory of Random Signals and Noise, pp.145-151, McGraw-Hill Book Company, Inc.

- (12) A. Papoulis (1991). Probability, Random Variables, and Stochastic Process, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 427-430.

質疑応答

河合雅司 (富山商船高等専門学校) :

VI-GPS において、エポック間隔は 1 秒という理解でよろしいでしょうか。もし 1 秒であれば 1 秒過去の速度を計測しているのでしょうか。

辰己公朗 :

エポック間隔は 0.2 秒です。速度計測は 0.2 秒毎で可能ですが、そうしますと計測値のバラツキが大きくなるために、過去 1 秒間の時間平均により速度を算出しています。