

電波を利用した位相差測位法による動的大変位 計測システムの実用化検証

御子柴正1・渡部浩正2・岡村敦3・鈴木信弘4・吉崎互5・茂木篤志6

 ¹独立行政法人防災科学技術研究所 主任研究官 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1) E-mail:miko@eq-eng.bosai.go.jp
 ^{2,5,6}三菱電機株式会社 通信機製作所 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)
 E-mail: hirowata@cew.melco.co.jp, w.yoshi@cew.melco.co.jp, a.mogi@cew.melco.co.jp
 ^{3,4}三菱電機株式会社 情報総合研究所 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船5-1-1)
 E-mail: okamura@isl.melco.co.jp, nsuzuki@isl.melco.co.jp

振動台上に構築された構造物の三次元動的変位量を,電波を用いて非接触計測するシステムに関し,実 用化検証実験を行った.構造物の振動計測すべき複数の点に発信機を取り付け,固定側に設置された4台以 上の受信機でこの電波を同時に受信し,相互の位相差を計測して発信機位置を推定する.複数の発信機は 2.44GHzを中心に各々異なる周波数を送信し,受信側で別個に認識される.位置精度約1cmを要求されるE-Defenseに適用するため,8台の受信機と8個の発信機を用い,防災科研の大型振動台上に模擬試験体を設置 し振動実験を行い,使用に耐えうる位置精度の結果を得た.今後は実際の適用に向けシステム仕様を構築 する.

Key Words : Positioning, Phase Differential, Radio, Earthquake Testing, Displacement Measurement

1.はじめに

阪神・淡路大震災を契機に実大構造物の試験体 を用いた実証的な振動破壊実験が可能な施設として E-ディフェンスの建設が進んでいる.このE-デ ィフェンスは,最大水平±100cm,鉛直±50cmの三次 元大変位を再現し,実大規模の構造物の破壊実験を 可能にする.そのため,動的破壊実験における計測に おいて最も重要な,試験体の動的変位,大変形を三次 元的に計測するための有効な手段として電波を用い た位相差測位法の開発を行ってきた.^{1)~2)}

そして,第期は要素技術開発として,建物の多点 震動応答を計測するために,建物の各変位計測点に 電波発信機を設置し,異なる位置に設置した複数の 受信センサで受信し,受信信号間の位相差から計測 点位置を推定する変位測定方式を提案し,電波実験 にて原理検証に成功している.^{3)~5)}

上記原理検証は,受信アンテナすなわちセンサの 個数Mを,計測点位置が一意に決定されるのに必要 な最低数の4個として行った.しかしこの場合,試 験体(実物大構造物)や周囲の建屋壁面等で反射す るマルチパス波の干渉等により,一個のセンサでも 受信信号の位相値が乱れると,変位計測結果に大き な誤差を生ずる恐れがある.

このような問題に対する方策として、 壁や床面 などに電波吸収体を設置して反射波を低減する。 送信電波に変調をかけて,直接波と反射波を分離し て測位する、受信センサ数に冗長性を持たせてマ ルチパスの影響を受けたセンサの影響を軽減する、 などの方策が考えられる.の方策は,他の方策と 組合せるとともに,一部の壁や床面に電波吸収体を 設置するなど部分的な対策としては有効と思われる が,単独の対策として行うには,反射が予想される 全ての面に対策を施さねばならず,実験の度に発信 機やセンサの配置を変えることも考慮すると,唯一 の対策として行うには無理がある.また,の方策 は,発信機やセンサの配置に左右されずに効果が見 込める点で有利と思われる.しかし,直接波との経 路長差が数m~数10mの反射波を分離するには, 送信電波の変調帯域に数十MHzの広帯域が必要と なるため,発信機や受信センサ等H/W関係が高コ ストとなることや電波法上の制約などの問題がある. これに対し, の方策は,センサを増やし冗長性を 増すことでマルチパス波の影響を平滑化する方式で, 広帯域の発信機やセンサを用いることなくマルチパ スの影響を低減することができるばかりでなく,測 位精度の要因であるセンサの幾何学的配置条件によ る幾何学的誤差増倍率も改善する効果も期待できる

という利点がある.以上の点から今回要求精度実現 のための実用化に向けた第 期開発として,の測 位方式を提案した.

本稿では,まず,測位に必要な最低センサ数であ る4より多数のセンサを設ける場合の位相差測位法 について述べる.次いで,計算機シミュレーション による提案測位法の原理検証結果並びに実電波を用 いた振動台上での検証試験の評価結果について示す.

2.多センサ間の位相差を用いた測位原理

図1に電波の位相差を利用した変位計測系の基本 構成を示す.第期の基本測位方式^{1)~3)}では, 受信アンテナすなわちセンサの個数Mは4個であり, 各センサ間の受信信号位相差 $\Delta \phi_{ij}$ を測定すれば計 測点(電波発信機)の位置は一意に決定できる.今 回は,センサ数MがM>4の場合,すなわち冗長な 観測系を考えた場合である.この場合も第n計測点 の位置 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ に関する方程式は,次のように 与えられる.^{1)~3)}

$$\sqrt{(x-X_i)^2 + (y-Y_i)^2 + (z-Z_i)^2} - \sqrt{(x-X_j)^2 + (y-Y_j)^2 + (z-Z_j)^2} = \Delta r_{ij}$$

$$(i, j = 1, 2, L, M; \quad i \neq j)$$
(1)

$$\Delta r_{ij} = \frac{\lambda}{2\pi} (\Delta \phi_{ij} + 2\pi N_{ij})$$
(2)

ここに, $[X_i, Y_i, Z_i]$ は第 i 受信アンテナ(センサ) の位置座標, Δr_{ij} は計測点から受信アンテナ i まで の経路長と計測点から受信アンテナ j までの経路長 との距離差を意味する観測値である.なお, N_{ij} は 電波の経路差の整数値バイアスであり,初期位置な どから既知または推定できる値である.

式(1)の方程式は未知数[*x*, *y*, *z*]について非線形であるから, M = 4の場合の測位方式と同様に関数;

$$f_{ij}(x,y,z) = \sqrt{(x-x_{i})^{2} + (y-x_{j})^{2} + (z-x_{j})^{2}} - \sqrt{(x-x_{j})^{2} + (y-x_{j})^{2} + (z-x_{j})^{2}}$$
(3)

を[x, y, z]を近似値[$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$]周りに展開し,近似値か ら真値への補正量[$\delta x, \delta y, \delta z$]を求めて発信機の位 置 [x, y, z] を推定する逐次近似法により位置 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ を推定する.この場合, [x, y, z] = [$\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$] + [$\delta x, \delta y, \delta z$] で,補正量 $\delta \mathbf{p} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$ は微小であるとして式(1)を展開 すると,次式が得られる.

$$\hat{\mathbf{A}} \,\,\delta \,\mathbf{p} = \delta \,\mathbf{r} \tag{4}$$



図-1 多センサ動的変位計測系の基本構成

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} \\ \frac{\partial f_{23}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{23}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{23}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} \\ M & M & M \\ \frac{\partial f_{M-1,M}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} & \frac{\partial f_{M-1,M}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial y} & \frac{\partial f_{M-1,M}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})}{\partial x} \end{bmatrix}$$
(5)
$$\delta \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \Delta r_{12} - f_{12}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ \Delta r_{23} - f_{23}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \\ M \\ \Delta r_{(M-1),M} - f_{(M-1),M}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \end{bmatrix}$$
(6)

ここに, は[$(M-1)\times3$]次元長方行列で, δ r は (M-1)次元ベクトルであることに注意する.距離 差観測値 Δr_{ij} に観測誤差が存在すると,式(4)の等 号は成立しない.そこで,式(4)を最小二乗原理に 則り, $\|\hat{\mathbf{A}}\delta\mathbf{p} - \delta\mathbf{r}\|$ が最小となる δ **p**を求める.こ こでは,各センサの観測位相誤差はほぼ均一と仮定 する.

式(4)の最小二乗解 $\delta \mathbf{p}$ は次式で与えられる.

$$\delta \mathbf{p} = \mathbf{A}^+ \delta \mathbf{r} \tag{7}$$

$$\mathbf{A}^{+} = (\mathbf{A}^{T}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^{T}$$
(8)

Â⁺はÂの擬似逆行列で,[3×(M−1)]次元長方行 列である.

以上のように補正量 $\delta \mathbf{p} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$ を算出し, $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}] \leftarrow [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}] + [\delta x, \delta y, \delta z]$ と更新する処理を 収束するまで繰り返せば,センサの個数Mが多数あ る場合にも計測点の位置 **p**=[*x*, *y*,*z*]^{*T*} が推定される . 勿論,式(5)~(8)の測位式はM>4のみならず,M = 4でも成立する.

また、測位誤差の大きさ σ_p は,次のように見積 もられる.

$$\sigma_{p} \cong \mathcal{E}_{\phi} (\lambda/2\pi) \sqrt{trace \left[\{ (\mathbf{A}^{T} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^{T} \} \{ \mathbf{A} (\mathbf{A}^{T} \mathbf{A})^{-1} \} \right]}$$

$$= \mathcal{E}_{\phi} (\lambda/2\pi) \sqrt{trace \left[(\mathbf{A}^{T} \mathbf{A})^{-1} \right]}$$
(9)

故に,センサが多数ある場合の本測位法における GDOP (Geometrical Dilution Of Precision;幾何 学的誤差増倍率)は次式で与えられる.

$$GDOP = \sqrt{trace(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}}$$
(10)

3.シミュレーションによる評価

上記提案の多センサ測位方式の原理検証を,まず, 計算機シミュレーションにて行った.

(1)シミュレーションモデル

シミュレーションの条件として,二個所の計測点 を想定し,キャリア周波数は fc=2.450GHz(波長

= 0.122 m),測位対象に指定した電波発信機#1 の発振周波数は fc + 10.0MHz,別の電波発信機#2 の 発振周波数は fc + 10.1MHz と与えた(周波数差 f = 100kHz). IF 周波数 *f*_{IF} = 10MHz, A/D サンプリ ング周波数 *f*_s = 40MHz,両波の受信信号 SNR は共に +31.6dB,帯域通過フィルタの FFT ポイント数は 2048 とした.

計測対象の計測点#1 の送信アンテナ真位置座標 は以下の通りである.

x = +1.007; y = +7.699; z = +1.588(m);

受信信号位相誤差はセンサ毎,試行毎に独立なガウ ス性ランダム系列で共通に 15deg(rms)で与えた.

センサ個数と配置モデルとして表-1~3の3ケー スを想定した.

(2) 評価結果

ここでは,逐次近似計算の繰り返し数を10回とし,逐次近似計算の計測点初期近似位置を真値から 各軸大きさが0.5m離れた位置に設定した.計測点 初期近似位置は軸毎,試行毎にランダムとした.また,整数値バイアス誤差が生じないように,各受信 信号の位相値は位相値真値とアンラップした.評価 は独立試行100回の統計平均で行った.

図-2 に評価結果を示す.横軸にケースの番号,

左縦軸に測位誤差の rms 値,右縦軸に GDOP を表示 している. σ_p は3軸二乗平均測位誤差のシミュレ ーション結果, σ_{p_theory} は式(9)で算出した3軸二 乗平均測位誤差の理論値である.Case 1,2 と Case3 との比較により,使用する受信センサ数が多 いほど測位精度は向上することが確認できる.これ は GDOP の比較からも裏付けられる.

表-1 各センサ(受信アンテナ)の位置座標:[Case1]

(センサ数 M=4)				
受信	座 標			
センサ	【X , Y , Z】 (m)			
Rx1	【+0.000 , +0.000 , +0.263】			
Rx2	【-3.522 , -0.055 , +1.341】			
Rx3	【+5.223 , +0.050 , +1.312】			
Rx4	【+1.495 , +0.100 , +3.205】			

GDOP = 8.1085

表-2 各センサ(受信アンテナ)位置座標:[Case2] (センサ数 M = 4, GDOP は Case1 とほぼ同等 の異なるセンサ配列)

受信	座 標			
センサ	【X , Y , Z】 (m)			
Rx1	【+0.000 , +0.000 , +0.270】			
Rx2	【-3.450 , -0.055 , +1.407】			
Rx3	【+5.105 , +0.053 , +1.200】			
Rx4	【+1.501 , +0.100 , +3.103】			

GDOP = 8.3412

表-3 各センサ(受信アンテナ)位置座標:[Case3] (センサ数 M = 8, Case1+Case2 の全ての8セ ンサを使用)

受信 センサ	標 【X , Y , Z】 (m)
Rx1	[+0.000 , +0.000 , +0.263]
Rx2	【-3.522 , -0.055 , +1.341】
Rx3	【+5.223 , +0.050 , +1.312】
Rx4	【+1.495 , +0.100 , +3.205】
Rx5	【+0.000 , +0.000 , +0.270】
Rx6	【-3.450 , -0.055 , +1.407】
Rx7	【+5.105 , +0.053 , +1.200】
Rx8	【+1.501 , +0.100 , +3.103】

GDOP = 5.1849



4.振動台における電波実験

本提案の測位方式を実証するため,防災科学技術 研究所の大型振動台において電波実験を行った.

(1) 実験系の構成

図-3 と図-4 に電波による複数点同時変位計測実験 系の配置と供試体の外観図,および表-4 に受信セ ンサおよび送信アンテナの位置座標を示す.大型振 動台上に置かれた試験体の2ヶ所(Tx1,Tx2),及 び端振り子構造になっているポール6ヶ所(Tx3~ Tx8)に送信アンテナを設置した.各送信アンテナ の変位を受信アンテナ Rx1~Rx8 の受信信号位相差 より,それぞれ独立かつ同時に測位を行った.送信 波は 2.4GHz の正弦波を用いた. Tx1~Tx8 の周波数 は,2,440MHz を中心にそれぞれ+0kHz,- 100kHz, +100kHz...・・-350kHz,+350,-400kHz と偏差させ た.また,アンテナ端送信出力+10dBm(10mW)とし た.送信アンテナおよび受信アンテナは,それぞれ アンテナゲイン 2.15dB,および 6dB のパッチ素子 アンテナを使用した.送信波の分離にはフィルタ長 0.1msec, 2048 ポイントの FFT を用い, 観測周期 100Hz 間隔毎に得られた FFT 出力信号についてそれ ぞれ独立に測位処理することにより各送信アンテナ の変位を独立に推定した.なお,実験に使用した振 動台がX軸方向のみであることから,X軸方向の計 測を中心とした受信アンテナ配置にて測定を実施し た.供試体の中段フレームに設けた Tx2 および Tx6 に対する GDOP はそれぞれ 3.857 と 2.944 である.

(2) 振動実験の結果

振動台で供試体構造を加振し,計測点 Tx1~Tx8 の 3次元位置の振動波形を測定によって求めた.振動 方向は図-3 の X 軸方向のみであり各種加振条件で 試験を行った,今回は条件 振動周波数:0.1Hz, 振幅 ± 100mm,定常波加振 条件 HachinoheEW 400gal 地震波の 2 条件における各 Tx2(試験体設 置),Tx6(単振り子ポール設置)の結果を代表で 示す.また,供試体の変位量計測として回転角度計 を用い本計測法との比較を行った.

図-5~図-10 に条件 Tx2, Tx6のx 軸方向の回転角 度計と同時に計測した 60sec 間の本計測結果,回転 角度計結果,偏差量を示し,同様に図-11~図-14



図-3 実験配置図



図-4 試験体と単振り子ポール外観

表-4 アンテナ位置座標

受信	座標
アンテナ	【X , Y , Z】 (m)
Rx1	【 +0.000 , +0.000 , +1.485 】
Rx2	【+10.052 , +1.171 , +10.692】
Rx3	【-10.233 , +3.288 ,+10.723】
Rx4	【 +8.226 , +0.978 ,+1.869 】
Rx5	【 +0.166 , +4.789 ,+5.546 】
Rx6	【 -6.938 , +0.947 ,+1.946 】
Rx7	【+10.216 , -3.800 ,+6.099 】
Rx8	【 -9.760 , -3.426 ,+6.178 】

送信	初期座標
アンテナ	【X , Y , Z】 (m)
Tx1	【+0.240 , -12.092 , +1.983 】
Tx2	【+0.238 , -11.987 , +1.011 】
Tx3	【+3.951 , -8.100 , +0.497 】
Tx4	【+5.309 , -12.828 , +0.785 】
Tx5	【-3.520 , -12.839 , +0.795 】
Tx6	【-3.794 , -8.128 , +0.470 】
Tx7	【-4.777 , -12.818 , +0.806 】
Tx8	【+5.136 , -17.087 , +0.784 】

に条件 の x 軸方向の回転角度計と同時に計測した 60sec 間の Tx2, Tx6 の本計測結果,回転角度計の 結果を示す.図-9,図-10 から X 軸方向の計測結果 と回転角度計結果の偏差は,1cm 以下となっている ことが分かる.

また図-11,図-13および図-12,図-14より地震波 加振についてもTx2,Tx6ともに加振方向(x軸)の 計測がほぼ追従できている結果が得られた.

また,表-5 に条件 での 8 センサでの Tx2 の誤 差の理論値,シミュレーション値および回転角度計 との計測偏差量を示し,表-6 に条件 の 8 センサ から 4 センサを選択して測位を行った Tx2 の誤差の 理論値,シミュレーション値および回転角度計との 計測偏差量を示す.この結果から,計測偏差量は理 論値およびシミュレーション値とがほぼ一致し,4 センサ測位方式と比較し,8 センサを使用した多セ ンサの測位方式の精度向上が確認された.











図-8 条件 回転角度計結果 Tx6



















夷_5	冬件	• 0 1Hz	+ 100mm of	Ty2	(8 センサ)

	X 座標	Y 座標	Z 座標		
	【 mm 】	【 mm 】	【 mm 】		
理論値	4.00	22.90	15.70		
シミュレーション値	4.00	22.90	15.70		
計測値偏差	4.62	23.19	27.81		

GDOP=3.857(Rx1~Rx8の8センサ組合せ)

表-6 条件 :0.1Hz ± 100mm of 1x2 (4 センサ)				
	X 座標	Y座標	Z座標	
	【 mm 】	【 mm 】	【 mm 】	
理論値	6.50	56.90	41.80	
シミュレーション値	6.50	57.00	41.70	
計測値偏差	7 08	43 98	28 55	

GDOP=10.090(Rx1,2,3,4の4センサ組合せ)

5 まとめ

電波を用いて構造物の振動を非接触計測するシ ステムに関し、試験体(実物大構造物)や周囲の建 屋壁面等で反射するマルチパス波による影響の軽減 を目的として、4より多数の受信センサを設けて冗 長性を有して測位する多センサを用いた測位方式を 提案し、実際の振動台での検証実験を行い、4セン サ測位と8センサ測位での理論値とシミュレーショ ン値と比較することで方式の原理検証および変位推 定精度の向上を確認した.

今後は位置計測精度約1cmを要求されるE-Defense に適用するための実用化システムとして受信センサ の台数,センサ配置の検討や,使用環境化における マルチパスの影響,またそのマルチパスの影響を受 けた位相誤差の大きな受信センサを測位の時に除外 するような対策を行っていく必要がある.

参考文献

 同村敦,御子柴正他:多点震動変位の位相差による 計測法,電子情報通信学会技術報告SANE2000-145, 2001-01.

- 2) 御子柴正他:変位計測手法の高度化に関する既往の 事例と今後の動向,土木学会第1回構造物の破壊過程 解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム 論文集,2000-3
- 3) 永井英樹,御子柴正他:電波位相差による多点震動 変位計測法の実験検証,2002年電子情報通信学会総 大,no.B-2-47,March2002.
- 4) 吉崎互,御子柴正他:電波を用いた3次元大変位計測 手法の開発-要素技術開発と振動実験への適用につい て-,土木学会第2回構造物の破壊過程解明に基づく地 震防災性向上に関するシンポジウム論文集,2001-3
- 5) A.Okamura,T.Mikoshiba, et al.,Proc. A Multi-Point Radio Displacement Mesurement Method for Testing Quake-proof Structure of ASME PVPC,PVP-Vol.445-1,pp.83-90,Aug.2002

(2003.6.30受付)

A PRACTICAL EXPERIMENT OF DYNAMIC DISPLACEMENT MESUREMENT SYSTEM USING RADIO WAVE CARIER PHASE POSITIONING METHOD

 Tadashi Mikoshiba, National Reseach Institute for EarthScience and Disaster Prevention Watanabe Hiromasa, Communication System Center, Mitsubishi Erectric Corp.
 Atsushi Okamura, Information Technology R&D Center, Mitsubishi Erectric Corp.
 Nobuhiro Suzuki, Information Technology R&D Center, Mitsubishi Erectric Corp.
 Wataru Yoshizaki, Communication System Center, Mitsubishi Erectric Corp.
 Atsushi Mogi, Communication System Center, Mitsubishi Erectric Corp.

A practical experiment of displacement measurement system, which will be used to measure 3D dynamic displacement of test structures built on earthquake testing platform, was demonstrated. In this system, a number of oscillators are set on measurement points of the structures and radio waves from oscillators are received by several (usually four or more) receivers set on fixed points outside the testing platform. Positions of measurement points are calculated from carrier phases of the received radio waves. The experiment using eight oscillators and eight receivers succeeded in obtaining enough positioning precision applicable to E-Defense project, which requires a centimeter precision.