

구조물 거동 모니터링을 위한 단일주파수 GPS 반송파 미지정수 결정의 성능향상

Improvement of Single-Frequency Ambiguity Resolution Performance for GPS-Based Structure Monitoring

이흥규¹⁾ · 이영진²⁾

Lee, Hung-Kyu · Lee, Young-Jin

¹⁾ 창원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사(E-mail:hkyulee@changwon.ac.kr)

²⁾ 경일대학교 공과대학 건설정보공학과 교수(E-mail:jylee@kiu.ac.kr)

Abstract

This paper describes an effective and fast algorithm for GPS carrier-phase ambiguity resolution (AR) which can apply for structure monitoring, and a series of simulation analyses have been carried out to demonstrate the performance of the algorithm. The results show that single-frequency AR performance is significantly improved in term of Time-To-Fix-First (TTFF) ambiguity.

1. 서 론

최근 들어 인공위성의 신호를 이용하여 3차원 위치를 정확하게 결정할 수 있는 광역적 위치결정체계인 GPS(Global Positioning System)가 실시간 구조물 거동 모니터링을 위해서 광범위하게 활용되고 있다. GPS를 구조물 거동 모니터링에 사용하기 위해서는 1-2cm 이내의 정확도를 제공할 수 있어야 하며, 이를 달성하기 위해서는 GPS 위성의 반송파 위상(carrier phase) 사용하는 상대측위를 수행해야 한다. 그러나 반송파 위상에는 위성과 수신기 사이 관측의 초기에 누적된 알 수 없는 정수배의 위상 수인 "미지정수(integer ambiguity)"를 포함하고 있으며, 이것은 GPS 수신기의 반송파 위상 관측기술의 제약에 의해 발생된다. 즉, GPS 수신기의 반송파 위상을 취득 기술이 위성에서 송신된 반송파 위상의 파장수를 계산하는 것이 아니라, 위성에서 송신된 신호와 수신기 내부에서 생성된 신호의 차에 의해 만들어지는 맥놀이 반송파 위상(carrier beat phase)를 누적하는 방법에 기반하고 있기 때문이다. 따라서 GPS 반송파 위상을 이용하는 측위에서 구조물의 거동 모니터링에 요구되는 위치 정확도를 확보하기 위해서는 "정확한 미지정수의 결정이 선행 되어야 하며 이것이 센티미터 수준의 GPS 측위를 위한 핵심 알고리즘 중의 하나이다.

동적모드(kinematic mode)에서 정확한 미지정수를 신속하게 수 초 이내에 정확하게 결정하기 위하여 반송파 L1과 L2 주파수를 동시에 수신할 수 있는 "이중주파수 수신기"가 사용되어야 하나, 1대 당 가격이 약 \$15,000USD~\$30,000USD에 달하는 최소 두 대의 수신기가 사용되어야 하기 때문에 모니터링 시스템 구축에 상당한 경제적 비용이 필요하게 된다. 이에 반해, 단기선의 GPS 정지측량에서 주로 사용되는 반송파 L1 주파수만을 수신하는 "단일주파수 수신기"는 1대 당 가격이 약 5,000USD 정도로 이중주파수 수신기에 비하여 매우 저렴하나 미지정수의 결정에 상당한 시간이 소요되어 효율적이지 못하다. 측위 알고리즘 관점에서 살펴볼 때, GPS 이중 주파수 관측값은 반송파 위상의 미지정수 결정단계에서는 추정된 실수 형태의 미지정수 사이의 상관성(correlation)을 줄여서 정확한 미지정수의 결정 성능을 크게 향상시키나 잇따르는 측위모드에서는 하드웨어의 가격에 비하여 그다지 큰 역할을 담당하지 못한

다. 이에 반해 GPS 단일주파 수신기의 경우 일반적으로 미지정수 결정에 수 십 초에서 수 백 초가 소요되어 실용적으로 동적 측위에서 거의 사용되지 않는다. 그러나 동적 측위모드에서 수신기의 위치가 수 센티미터에서 수 십 센티미터 정도 변하는 구조물 모니터링이라는 특별한 응용분야만을 고려한다면, 사전 관측을 통해 근사적으로 알 수 있는 수신기의 위치 정보를 미지정수 추정을 위한 수학적모형 (mathematical model)과 통계적모형(stochastic model)에 적절하게 적용하여 그 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

위성의 반송파 위상 관측값을 고정밀 측위와 구조물 변위 검출과 같은 공학적 응용분야에 활용하기 위한 연구가 GPS 시스템의 개발 초기부터 연구 되었으나 관측값에 포함된 미지정수의 결정을 위해서는 수신기가 정지된 상태에서 장시간의 관측이 필요하기 때문에 주로 정지측량에 의해 대규모 댐과 같은 구조물의 장기적인 변위 모니터링에 주로 사용되었다(Niemeier 1992; Seeber 1993). 1990년대 초반에 이루어진 신속하게 반송파 위상 관측값의 미지정수를 결정 할 수 있는 OTF(On-The-Fly)기법의 개발 (Frei & Beutler 1990; Teunissen 1993)과 GPS 수신기 내부에서 항법계산을 수행하는 마이크로프로세서의 성능 향상 그리고 수신기 간의 데이터 통신 기술의 확보를 통하여 Trimble과 Leica등과 같은 수신기 제조사들은 이동중에서 1-2cm 정확도의 위치를 실시간으로 결정이 가능한 RTK(Real-Time Kinematic) 기능을 가지는 수신기를 상용화하였다 (Talbot 1996; Rizos 2000). 이러한 GPS RTK 수신기를 다양한 구조물의 실시간 거동 모니터링에 활용하기 위한 기술과 거동 검출 능력 검증 그리고 측위에 포함된 관측 오차를 줄이기 위한 연구들이 국외에서 활발하게 수행되었으며(Lovse 등 1995; Ashkenazi 등 1996; Duff & Hyzak 1997; Roberts 등 2001), 또한 국내에서도 교량 거동의 실시간 모니터링(박운용 등 1998), 흙댐의 변위 측정(이진덕 1998)에 GPS RTK 기술을 사용하기 위한 방안들에 대한 연구가 수행 되어 왔다.

선행된 연구들을 살펴보면 다양한 GPS RTK 측위 기술의 응용 분야중의 하나인 구조물 거동의 모니터링이라는 조건을 고려하는 측위 알고리즘을 개발하기 보다는 고가의 상용 이중주파수 수신기를 사용하여 각각의 적용 분야에의 활용이 주를 이루었다. 따라서 구조물 거동 모니터링이라는 특수한 상황에서는 연속적인 관측에 의해 얻어지는 대상 측정점의 위치가 수 십 센티미터 정도 변화한다는 조건을 측위를 위한 수학적 그리고 통계적 모델에 고려하여 저가의 단일주파수 수신기를 사용하더라도 신속한 미지정수의 결정을 통해 센티미터 수준의 측위를 수행할 수 있는 기술의 개발이 필요하며, 이를 통해 GPS 기반의 구조물 모니터링 시스템 구축에 소요되는 비용을 크게 줄일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단일주파수 GPS 수신기를 실시간 구조물 모니터링에 사용하기 위하여 극복해야 하는 기술적 문제인 GPS 위성의 반송파 관측값의 미지정수를 신속하고 정확하게 결정할 수 있는 알고리즘을 개발하고 그 성능을 시뮬레이션에 의해 입증하고자 한다.

2. 단일주파수 GPS 관측값을 사용한 미지정수 결정

미지정수 결정절차(Ambiguity Resolution)는 크게 두 단계, 즉 '미지정수의 추정(Ambiguity Estimation)'과 추정된 "미지정수의 타당성검정(Ambiguity Validation)"으로 이루어진다. 먼저, 미지정수의 추정은 초기의 미지정수를 실수라는 가정을 통하여 "실수 형태의 미지정수(real-valued ambiguity)"와 기선의 해 (baseline solution)가 최소제곱법에 의해 구해진다. 여기서 미지정수가 실수의 형태를 하고 있기 때문에, 이 해를 일반적으로 '실수의 해' (float solution)로 부른다. 그런 후에 실수 형태의 미지정수와 이와 관련된 확률적모형을 사용하여 미지정수 검색 공간을 생성한 후, 미지정수의 '정수(integer)' 조건을 이용하여 검색을 실시한다. 미지정수 검색에서 최적의 미지정수 조합을 찾기 위하여, 생성된 검색 공간에서 이차형태(quadratic form)의 추정 잔차가 최소가 되어야 한다는 조건을 사용한다. 본 절에서는 구조물 모니터링 분야에 한정하여 단일주파 수신기에 의해 취득된 관측값을 동적 모드에서 신속하게 정확한 미지정수를 결정할 수 있는 알고리즘이 제안될 것이다.

2.1 GPS 이중차분 관측방정식

GPS 수신기에 의해 취득되는 관측값은 의사거리와 반송파가 있으며, 만약 두 수신기에서 각각 동일한 두 개의 위성으로부터 관측값을 취득 하였다면 두 수신기 사이와 두 위성 사이에 수학적 차분을 적용하여 이중 차분 관측값을 형성 할 수 있다. 특히 두 구조물 거동 모니터링을 위한 시스템 구성에서 기준국 수신기와 구조물 모니터링 대상점에 위치하는 수신기(이동국) 사이의 기선장이 일반적으로 10km 이하의 단기선이기 때문에 공간적 상관을 가지는 오차들이 모두 소거되어 이중차분 의사거리와 반송파 관측값은 아래의 식 (1)과 (2)로 각각 나타낼 수 있다.

$$\nabla\Delta R = \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta\varepsilon_R \quad (1)$$

$$\nabla\Delta\phi = \frac{1}{\lambda}\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta N + \nabla\Delta\varepsilon_\phi \quad (2)$$

여기서, Δ 는 두 수신기 사이의 차분, ∇ 는 두 위성차이의 차분, $\Delta\nabla$ 는 두 수신기와 두 위성 사이의 이중차분을 나타내며, 또한. R 은 위성의 의사거리 관측값, ϕ 는 위성의 반송파 위상 관측값, ρ 는 위성과 수신기 사이의 기하거리, ε 는 관측 잡음, N 은 미지정수 그리고 λ 는 $L1$ 반송파의 파장이다.

2.2 함수적 모델링

단일 주파수 GPS 수신기에 의해 취득된 이중차분 관측값과 구조물 거동 모니터링을 위해 설치된 수신기의 근사위치를 선형화하면 다음과 같은 Gauss-Markow 모델로 나타낼 수 있다.

$$L = AX + V \quad (3)$$

여기서, L 은 관측값 벡터, A 는 계수행렬 그리고 V 는 잔차벡터로 m 개의 위성으로부터 관측값이 취득되었다 한다면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} A_b & \lambda_1 I_{m \times m} \\ A_b & 0_{m \times m} \\ I_{3 \times 3} & 0_{3 \times m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$X = \begin{bmatrix} X_b \\ X_a \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L = \begin{bmatrix} \nabla\Delta\phi - \nabla\Delta\rho_0 \\ \nabla\Delta R - \nabla\Delta\rho_0 \\ r_{app} - r_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, A_b 는 $m \times 3$ 계수행렬로 위성과 수신기 사이의 상대적 기하관계 정보를 포함하고 있으며, X_b 는 3×1 미지의 기선추정벡터로 선형화를 위한 초기 수신기 좌표에 대한 3차원의 기선벡터의 증감을 나타내며, X_a 는 $m \times 1$ 의 미지정수 벡터, r_{app} 는 사전에 관측된 모니터링 대상 지점의 수신기의 근사좌표, r_0 는

GPS 관측값의 선형화에 사용된 좌표를 나타낸다. 만약 r_{app} 와 r_0 가 같으면 $(r_{app}-r_0)$ 는 3×1 의 0 벡터가 된다. 또한 p_0 는 선형화에 사용된 수신기 좌표에 의해 계산된 위성과 수신기 사이의 근사 기하거리를 나타낸다.

2.3 통계적 모델링

식(3)에서 미지의 변수벡터 X 의 추정에 사용되는 관측값들의 불확실성을 나타내는 통계 모델은 다음과 같이 공분산 행렬로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_l = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} Q_{\nabla\Delta\phi} & 0 & 0 \\ 0 & Q_{\nabla\Delta R} & 0 \\ 0 & 0 & Q_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, σ_0^2 는 사전분산인자, $Q_{\nabla\Delta\phi}$ 와 $Q_{\nabla\Delta R}$ 는 반송파 위상과 의사거리 관측값의 불확실성을 나타내는 $m \times m$ 여인자행렬로 위성의 고도각 정보로부터 모델링 할 수 있으며, Q_r 은 3×3 는 모니터링 대상 지점의 수신기 근사좌표 r_0 의 불확실성을 나타내는 여인자행렬로, 예상되는 대상점의 거동의 정도에 따라 결정 된다.

2.4 미지정수 추정

최소제곱원리($v^T P v = \text{최소}$)에 의해서, 식(3)에서의 미지변수벡터 \hat{X} 와 여인자 행렬 $Q_{\hat{X}}$ 은 다음과 같이 얻어지며 이것을 추정하고자 하는 기선의 실수해라 부른다.

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (8)$$

$$Q_{\hat{X}} = (A^T P A)^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{\hat{X}_b} & Q_{\hat{X}_b, \hat{X}_a} \\ Q_{\hat{X}_a, \hat{X}_b} & Q_{\hat{X}_a} \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 $\hat{X} = (\hat{X}_b, \hat{X}_a)^T$ 이고, \hat{X}_b 는 추정된 기선벡터 성분의 선형화 기준점에 대한 증감, \hat{X}_a 는 추정된 실수형태의 미지정수 벡터이다.

식(3)과 식(8)로부터 최소제곱의 잔차는 다음과 같이 얻어지며,

$$V = L - A\hat{X} \quad (10)$$

사후분산인자는 다음식에 의해 계산될 수 있다.

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\Omega_0}{f} \quad (11)$$

여기서, f 는 자유도 이고, 실수해의 2차 형식의 최소제곱잔차 Ω_0 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Omega_0 = V^T P V = L^T P L - L^T P A \hat{X} \quad (12)$$

위의 해는 미지정수가 '정수'라는 정의에도 불구하고, 실수의 형태를 가지고 있기 때문에 '실수 해(float solution)'라 불린다. 실수 해의 추정 이후에는 앞에서 언급된 여러 가지 미지정수 검색 기법 중에서 한 나를 사용하여 '정수' 형태의 미지정수를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 Delft 공과대학에서 개발한 LAMBDA를 미지정수 검색 기법(Teunissen 1993)을 사용하였다. 만약 미지정수 검색을 통해 실수 형태의 미지정수가 정수벡터 $\tilde{\hat{x}}_k$ 로 결정 되었다고 한다면, 식(3)에서 추정하고자하는 기선벡터의 미지정수 '고정 해(fixed solution)와 여인자행렬 그리고 최소제곱잔차는 다음과 같이 얻어 진다.

$$\tilde{\hat{x}}_b = \hat{X}_b - Q_{\hat{x}_b, \hat{x}_a} Q_{\hat{x}_a}^{-1} (\hat{X}_a - \tilde{X}_a) \quad (13)$$

$$Q_{\tilde{\hat{x}}_b} = Q_{\hat{x}_b} - Q_{\hat{x}_b} Q_{\hat{x}_a}^{-1} Q_{\hat{x}_a, \hat{x}_b} \quad (14)$$

$$\tilde{\Omega}_0 = \Omega_0 + (\hat{X}_a - \tilde{X}_a)^T Q_{\hat{x}_a}^{-1} (\hat{X}_a - \tilde{X}_a) \quad (15)$$

2.5 미지정수 타당성 검정

미지정수 검색 절차로부터 얻어진 최적 (best)과 차적(second best) 미지정수 조합이 각각 K_m 과 K_s 라 한다면, 2차의 최소제곱잔차가 위의 식 (15)을 이용하여 Ω_m 과 Ω_s 로 계산될 수 있다. 이때 타당성 검증정에 사용되는 통계치인 F-비는 다음과 같이 정의 되며, 일반적으로 F-비가 3 이상이면 최적의 미지정수 조합이 정확한 미지정수로 확정된다(Rizos 1996)

$$F = \frac{\Omega_s}{\Omega_m} \quad (16)$$

3. 시뮬레이션에 의한 성능 분석

제안된 미지정수 결정 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 GPS 관측값을 시뮬레이션을 통하여 의해 생성하였다. 생성된 GPS 관측값은 그림 1에서 보이는 바와 같이 6개의 위성으로부터 약 1km가 떨어진 두 대의 단일주파수 수신기에 대한 의사거리와 반송파이다. 이렇게 얻어진 관측값을 구현된 알고리즘을 적용하여 그 성능을 다양한 모니터링 조건에 대해 네 가지의 초기 이동국의 위치 정보의 불확실성 조건에 대해 테스트를 실시하였다. 고려된 근사위치의 불확실성은 10cm, 25cm, 50cm, 1m가 고려되었다. 이 불확실성은 GPS의 정지측위 혹은 토탈스테이션과 같은 지상측량 장비에 의해 결정된 거동 모니터링 대상점의 위치가 구조물의 거동에 의해 변하기 때문에 발생 한하기 때문에 대상 구조물에 예상할 수 있는 거동의 정도에 따라 달라진다.

그림 2는 식 (16)에 의해 계산된 F-비를 나타낸 것으로 이 크기가 증가하면 최적의 미지정수 조합이 정확한 값이 될 확률이 높아지는 것을 나타낸다. 근사위치의 불확실성 조건들과 이중주파수 수신기를 사용한 경우(Dual-Frequency: DF)와 단일주파수(Single-Frequency: SD) 수신기와 기존 알고리즘을 적용한 경우가 비교되어 있다. 그림 2는 시험 결과의 전체적인 경향을 보여 주고 있다. 그러나 보다 의미 있는 결과는 미지정수 타당성 검정시험에서 F-비의 임계값을 3이라 할 때 최초로 검정하는데 소요되는 시간이며 이것은 표 1에 나타나있다. 결과를 살펴보면 이중주파수의 경우 9초가 그리고 단일주파수 수신기와 기존의 알고리즘을 적용할 경우 112초가 소요됨을 알 수 있으며 이것은 GPS 반송파 상대측위에서 이중주파수 수신기가 사용되어야 하는 이유를 잘 보여주고 있다. 즉, 단일주파수 수신기에 의해 미지정수를 결정 할 수 있지만 오랜 시간이 소요되기 때문에 이 시간동안은 센티미터 수준의 측위를 수행

할 수가 없기 때문이다. 이에 반해 단일주파수 수신기에 본 연구에서 제안한 알고리즘을 적용할 경우 그 성능이 크게 향상됨을 알 수 있다. 수신기 근사위치의 불확실성이 10cm와 25cm의 경우 이중주파수의 경우에 비해 양호한 결과를 50cm의 경우에도 유사한 결과를 보여주며, 또한 1m의 경우에도 비록 이중주파수에 비해서는 떨어지나 기존의 알고리즘에 비해 미지정수 결정에 소요되는 시간이 약 6배 정도 향상됨을 결과는 보여주고 있다.

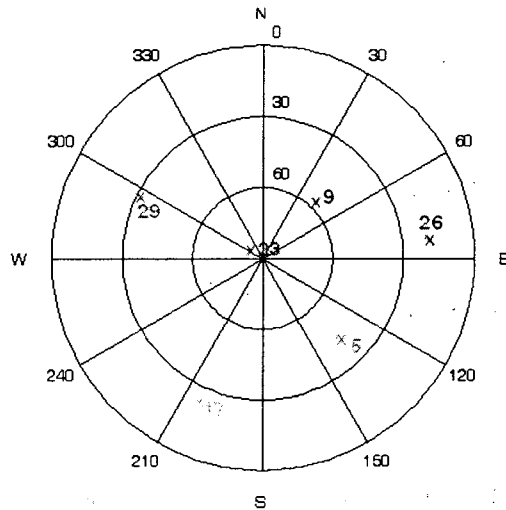


그림 1. 시험에 사용된 위성의 천공도

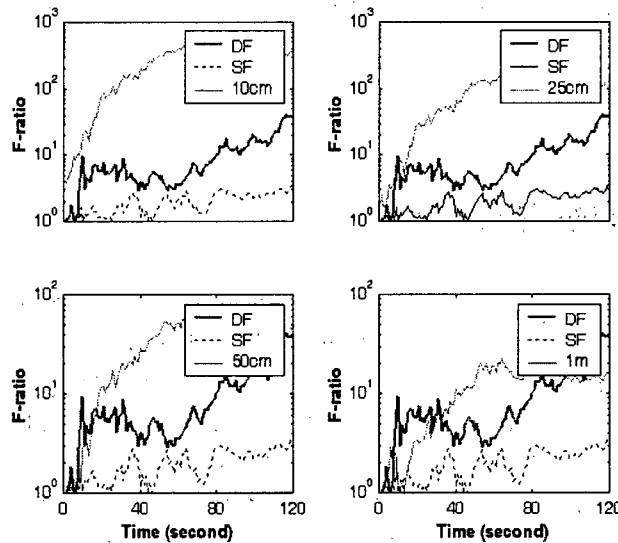


그림 2. 해의 누적에 따른 F-비의 변화

표 1. 최초의 미지정수 결정에 소요되는 시간

Type of Solution	Time-To-First Fix (sec)	Type of Solution	Time-To-First-Fix(sec)
Dual	9	Single(50cm)	11
Single	112	Single(1m)	18
Single(10cm)	1		
Single(25cm)	5		

4. 결 론

본 연구에서는 단일주파수 GPS 수신기를 실시간 구조물 모니터링에 사용하기 위하여 극복해야 하는 기술적 문제인 GPS 위성의 반송파 관측값의 미지정수를 신속하고 정확하게 결정할 수 있는 알고리즘이 제안되었다. 제안된 알고리즘을 시뮬레이션에 의해 다양한 조건들에 대하여 평가된 결과 수신기 근사위치의 불확실성이 10cm와 25cm의 경우 이중주파수의 경우에 비해 양호한 결과를 50cm의 경우에도 유사한 결과를 보여주며, 또한 1m의 경우에도 비록 이중주파수에 비해서는 떨어지나 기존의 알고리즘에 비해 미지정수 결정에 소요되는 시간이 약 6배 정도 향상됨을 결과를 얻을 수 있을 알 수 있었다. 본 연구는 시뮬레이션 해석에 의한 결과로 향후 실제 관측 실험을 통한 성능 평가가 추후에 이루어질 예정이다.

참고문헌

- 박운용, 장상규, 정성모, 이흥규 (1998), 교량 거동 모니터링을 위한 GPS의 적용, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 377-340.
- 이진덕 (1998), Kinematic GPS 측량기법에 의한 구조물의 변형 모니터링, 한국측지학회지, 제19권, 제1호, pp. 27-40.
- Ashkenazi, V., dodson, A., Moore, T. and Roberts, G. (1996), Real time OTF GPS Monitoring of the Humber Bridge, *Surveying World*, Vol. 4, No. 4, pp. 26-28.
- Duff, K. and Hyzak, M. (1997) Structural Monitoring with GPS.
<<http://www.tfhrcc.pubrds/pubrds/july97/gps.htm>>.
- Frei S and Beutler G (1990), Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach FARA: theory and first results, *Manuscripta Geodaetica*, Vol. 15, No. 4, pp. 325-356.
- Niemeier, W. (1992), Potential of the Global Positioning System (GPS) for Local Deformation Studies, *Proceedings of 6th Int. FIG Symp. on Deformation Measurements*.
- Seeber, G. (1993), *Satellite Geodesy*, Walter de Gruyter, Berlin New York, 531pp.
- Rizos, C. (1996), *Principle and practice of GPS surveying*, School of SSIS, UNSW, 555pp.
- Roberts, G., Meng, X. and Dodson, A.H. (2001), The Use of Kinematic GPS and Triaxial Accelerometers to monitor the Deflections of Large Bridges, *Proceedings of 10th Int. symp. on Deformation Measurements*, Orange, Calif.
- Teunissen, P.J.G. (1993,) A New Method for Fast Carrier Phase Ambiguity Estimation. *Proceedings of IEEE PLANS-'93*, Las Vega, 11-15 April, pp. 562-573.
- Lovse, J., Teskey, W.F., Lachapelle, G. and Cannon, M.E. (1995), Dynamic deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 121, No. 1, pp. 35-40.