

GPS와 IMU에 의한 구조물 변형 검색 Structure Deformation Check with GPS and IMU

김진수¹⁾ · 박운용²⁾ · 장상규³⁾ · 안상준⁴⁾

Kim, Jin Soo · Park, Woon Youg · Jang, Sang Kyu · An, Sang Jun

- 1) 동아대학교 대학원 토목공학과 시간강사(E-mail:8051kjs@hanmail.net)
- 2) 동아대학교 공과대학 토목해양공학부 교수(E-mail:uypark@daunet.donga.ac.kr)
- 3) 상주대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail:skjang@sangju.ac.kr)
- 4) 동아대학교 대학원 토목공학과 박사과정(E-mail:sangjan@hanmail.net)

Abstract

Such social structures as bridges, buildings, dams and towers have been transformed by their own load or fundamental ground. They have been behaved by other external causes. These regular or irregular behaviors threaten to do their users safety. Therefore, to monitor the load of the structures or reaction shown by them could help to verify their behaviors. RTK GPS allows the use of a static base station and remote rover unit to allow for data collection within several seconds and in real time. It is useful for monitoring the behaviors of massive structures like bridges. In this Study, Among GPS methods, we used RTK GPS to analyze the precision of monitoring and then on the basis of it, we developed a monitoring system using RTK GPS when measured the behavior of main tower of a suspension bridge by using RTK GPS. Comparing a deviation between observation values, X axis was 1mm, Y axis was 1mm and Z axis 2.2mm. It turned out that it was possible to monitor and measure structures by RTK GPS.

1. 서론

구조물 변형에는 다른 형태 즉, 두 가지의 그룹으로 구분할 수 있다. 첫번째는 수압, 온도차 또는 느린 지각 활동에 의한 장기간의 느린 움직임이고, 두 번째 종류는 불규칙한 풍속, 지진 또는 차량 하중에 기인하는 단기간의 빠른 움직임이다. 빠른 변형은 일반적으로 재해 조사, 위험 분석에 대해 더욱 중요하고, 일시적인 정적 GPS 관측에 의한 모니터링에는 어렵다. 느린 변위, 온도의 팽창/수축 또는 침하는 상대적으로 오랜 시간 동안에 발생하고, 몇 시간 또는 그 이상의 시간에 대한 GPS 자료의 평균 시간은 반복 측량으로 변형 경향을 파악하기 위해서 거의 mm 수준의 정확도로 기선 해석을 제공하는데 사용된다. 몇 초 간격으로 발생하는 빠른 변형을 측량하기 위해서, 고샘플링 비율(20Hz)로서 GPS를 사용할 수 있다. 이것은 유동성이 큰 구조물 즉, 현수교, 타워, 큰 빌딩에 대한 모니터링에 GPS를 이용하는 것이다. 이는 차량이나 바람의 영향을 발견할 수 있는 크기(>1cm)와 빈도(<10Hz)의 거동을 파악할 수 있다. 구조물 모니터링에 GPS를 사용할 때, 하나 이상의 다른 GPS 안테나를 중요 구조물에 부착시키고, 기준국은 명확히 위성 가시성이 좋은 근처의 위치에 설치한다. 만약 이 관측방법을 단기선에 대해 측량한다면 대류권 영향에 의한 오차는 무시할 수 있다. 그러나 복잡한 케이블, 타워 크레인에 의한 신호 단절 오차와 교량 상판, 빌딩 벽, 댐의 벽에 의한 신호 반사에 따른 오차 즉, 다중경로로 오는 오차는 대부분 피할 수 없기 때문에 특정한 모니터링 환경에 대해 주의 깊게 연구되어야 한다.

구조물상의 중요한 위치에서 GPS의 사용은 절대적 측량과 상대적 측량의 해석을 통해 구조물 거동의 정밀한 모니터링이 가능하다. 구조물상의 중요 위치에 대해 시간에 따른 변위를 획득할 수 있다. 예를 들면 교량의 경우, 적당한 위치에 설치된 GPS 수신기는 교량 상판, 타워의 변위 진폭뿐만 아니라 국부

적 기준점에 대한 상대적인 교량의 주요 요소의 움직임을 실시간으로 나타낸다. 접합부에 대한 상대적인 교각의 움직임, 교량 기초에 대한 타워의 꼭대기, 지반에 대한 지간은 cm 수준의 정확도로 획득될 수 있다. 구조물에 설치된 GPS 시스템에 의해 제공되는 정보는 지연 없이 정보를 제공하며, 이때 구조물의 반응은 다른 초기 변위 또는 변화하는 동적 특성에 따라 평가할 수 있고, 실시간 모니터링은 불규칙적인 구조물 활동에 대해 경보 시스템으로 사용할 수도 있다.

관성항법장치는 외부의 도움없이 관성센서인 자이로(Gyro)와 가속도계로 측정되는 항체의 가속도와 각속도를 이용하여 항체의 이동속도 및 자세에 대한 정보를 계산하는 시스템이다. 관성항법장치는 일반적으로 관성센서가 고정판 위에 장착되는 Gimbaled 관성항법장치와 관성 센서가 고정판없이 동체에 직접 부착되는 Strapdown 관성항법장치로 나뉘어진다. 이중 스트랩다운 관성항법시스템(SDINS; Strap-Down INS))은 동체에 직접 부착된 자이로와 가속도계의 출력을 이용하여 기준좌표계에 대한 항체의 상대적인 위치, 속도 및 자세를 컴퓨터로 계산하게 된다. SDINS는 GINS에 비해 소형, 저가, 저중량, 저전력소비, 정비 및 설계의 용이 등의 장점을 가지며, 각속도 측정 범위가 넓은 스트랩다운 자이로와 항법 컴퓨터의 성능 향상에 힘입어 사용되어 왔으나 최근에 MEMS(Micro Electro-Mechanical System)기술의 발달로 저가의 반도체형 관성센서가 개발되면서 사용범위가 넓어지고 있다. 이러한 반도체형 관성센서는 기존의 관성센서에 비하여 성능이 떨어지므로 제어 및 소형 움직임 관측용으로 적용하고 있다. 본 연구에서는 반도체형 관성센서인 IMU(Inertial Measurement Unit)를 이용하였다.

2. 다변량 분석 및 검색

변형 분석에 대한 전체적인 노력에도 불구하고 다량의 관측값이 요구되고 있으며, 이들 관측값은 변형을 일으키는 풍속, 온도, 압력 등의 자료와 이의 반응 결과 즉, 가속도, 변위, 기울기, 응력 등이다. 장기간의 관측 자료들을 이용한다면, 부분적인 반응 자료는 바람, 온도, 압력의 변화에 상당히 관련된다고 설명할 수 있고, 모니터링 상태의 지표를 획득하기 위해서 다음과 같은 처리과정이 필요하다.

변수들에 관련된 p 가 연속적으로 측정되는 경우에는 제어의 필요성이 있다. 이들 변수들이 평균벡터 $\mu' = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)$ 와 공분산 행렬 Σ 에 의해 p 차원 다변량 정규표준을 따른다고 가정하고, 여기서, μ_i 는 i 번째 변수에 대한 평균이고, Σ 는 p 변수의 공분산과 변수를 고려한 $p \times p$ 행렬이다. 다변량 정규분포는 각각의 변수에 가정된 단일변량 정규분포와 같은 p 차원이다. 기술적인 처리는 자료 분포가 불안정할 때 통계적인 제어가 곤란하므로 시작 단계에서 한계값을 획득할 목적으로 제어한계를 수립한 후, 자료는 알맞은 정규분포로 가정된다. 그 결과는 각각의 변수에 대한 단일변량 제어 도표의 일반적인 제어 한계 타당성과 같은 정규분포 가정을 요구한다. 이 가정은 적절한 다변량 표준 goodness-of-fit 검정으로 검사할 수 있다. 처리의 한계가 시작 단계에 있고, 예전 자료의 하위집단 샘플 m 이 변수 μ 와 Σ 를 추정하는데 이용할 수 있다고 가정한다면, 아래 벡터의 기준 샘플로부터 p 변수의 관측값을 나타낸다.

$$X_i = \begin{bmatrix} X_{i1} \\ X_{i2} \\ \vdots \\ X_{ip} \end{bmatrix} \quad \bar{X}_i = \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \\ \vdots \\ \bar{X}_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\bar{X}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{ij}$

그리고 추정된 공분산 행렬은

$$S_m = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X}_m)(X_i - \bar{X}_m)^T$$

이며, Gnanadesikan & Kettenring는 필요한 제어 한계를 구성하는 것이 가능한 β 분포를 가지는 Q_i 를 보

여주고 있다. 이 분포에 기초한 최저 제어 한계는 다음과 같이 주어진다.

$$LCL = \frac{(m-1)^2}{m} B(1-\alpha/2; p/2, (m-p-1)/2) \quad (3)$$

$$UCL = \frac{(m-1)^2}{m} B(\alpha/2; p/2, (m-p-1)/2) \quad (4)$$

여기서, $B(\alpha; p/2, (m-p-1)/2)$ 는 변수 $p/2$ 와 $(m-p-1)/2$ 을 가진 B 분포의 $1-\alpha$ 백분위수이다. β 와 F 분포를 사용한 random 변수사이의 관계는

$$\frac{(p/(m-p-1))F(\alpha; p, m-p-1)}{1 + (p/(m-p-1))F(\alpha; p, m-p-1)} = B(\alpha/2; p/2, (m-p-1)/2)$$

이고, 그때 다음의 제어 한계를 설정하는 것이 가능하다.

$$LCL = \frac{(m-1)^2}{m} \times \frac{(p/(m-p-1))F(1-\alpha/2; p, m-p-1)}{1 + (p/(m-p-1))F(1-\alpha/2; p, m-p-1)} \quad (5)$$

$$UCL = \frac{(m-1)^2}{m} \times \frac{(p/(m-p-1))F(\alpha/2; p, m-p-1)}{1 + (p/(m-p-1))F(\alpha/2; p, m-p-1)} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)은 F 분포로부터 백분위수의 형태에서 구해진다.

평균에서의 shift가 항상 통계치 Q_i 에서 증가하기 때문에 대부분의 경우에서 LCL은 0으로 설정되거나 무시될 수 있다. Q_i 는 평균 백터에서서의 shift에 민감할 뿐만 아니라 자료의 공분산 행렬에서 변화하는 것이다. 만약 공분산 행렬이 변화했다면, 그것은 Q_i 의 비정상적인 작은 값의 결과일 것이다. 그런 변화를 발견하기 위해서 0이 아닌 LCL이 필요하다.

3. 관측 및 분석

3.1 연구대상

본 연구에서는 모니터링이 가능한 대형구조물인 현수교를 대상으로 RTK GPS와 계측 센서들을 결합한 구조물 모니터링 목적에 적합한 그림 1과 같은 실험대상을 선택하였고, 실험 대상 구조물은 현재 시공이 완료되어 차량이 운행중인 광안대로의 주탑을 선택하였다. 연구 대상 구조물의 거동 모니터링을 해석하기 위해서 하나의 주탑을 대상으로 주탑 최상부에 GPS, 가속도계, 풍향 및 풍속계를 설치하였다. 광안대로는 1994년 12월에 착공하여 2003년 1월에 개통하였으며, 전체 총연장은 7.42km로서 현수교 길이는 0.9km, 폭은 18~25m로서 2층 구조로 되어있다. 최대 풍속은 45m/sec로 설계되었으며, 주탑의 높이는 부산 앞바다 평균해수면을 기준으로 116.5m이다.



그림 1. 실험대상



그림 2. GPS 관측

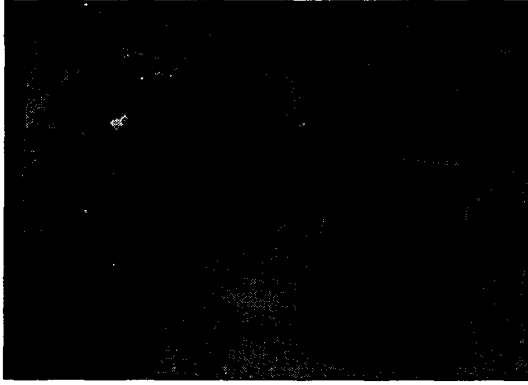


그림 3. IMU

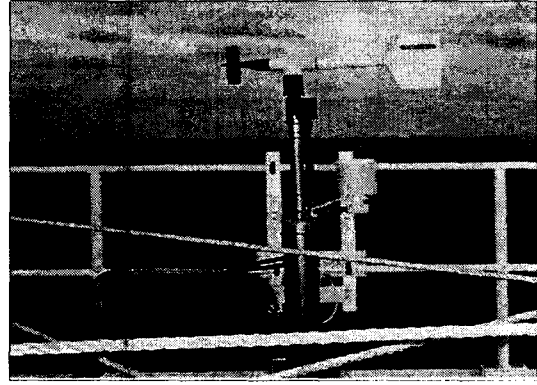


그림 4. 풍향풍속계

그림 2는 GPS 측량에서 이동국의 모습을 보여주고 있다. 기준점 GPS는 평지에 설치하고, 이동국은 광안대로 주탑1 즉, 해운대 방향에 가까운 주탑중에서 내측(광안리 해수욕장)에 위치한 주탑에 설치하였다. 관측 장비의 최대 자료 sampling율은 20Hz 이므로 초당 20개의 자료를 획득하여 이를 평균함으로써 1초 자료를 획득하게 된다.

그림 3은 IMU로서 획득된 자이로값과 가속도를 실시간으로 컴퓨터에 전송하며, 이를 자동으로 저장하게 된다. 저장된 자료는 IMU 자체의 필터링을 통해서 획득되었기 때문에 오차 처리없이 그대로 사용하였다. 그림 4는 광안대로 주탑 정상부에 설치된 풍향 및 풍속계를 나타내고 있다. 풍향은 바람의 방향을, 풍속은 바람의 속도를 획득하여 실시간으로 광안대로 관리사무소에 위치한 메인 컴퓨터에 전송한다. 이 장비는 풍차의 회전속도가 풍속에 비례하는 원리를 이용한 것으로 풍차풍속계의 풍차를 수직꼬리날개를 가진 유선형 동체의 선단에 붙여서 기록계에 풍향과 풍속을 동시에 기록하도록 한 일종의 자기 풍향풍속계이다. 프로펠러풍속계의 회전축에 직류 또는 교류의 소형발전기를 장치해서, 그 기전력을 기록하도록 한 것으로 풍향풍속의 순간값을 지시 또는 연속적으로 기록하는 형태로 수감부, 지시계, 자기 기록계로 구성되어 있다.

3.2 분석

GPS관측은 최대 표집 간격이 20Hz이지만 본 연구에서는 자료 처리를 위해서 1초 단위로 평균하여 관측되었고, 관측된 자료를 Static GPS로 관측된 자료의 기선처리 결과와 비교하여 분석하였다. 그림 5는 GPS N축에 대해 나타낸 모니터링 변화량이고, 그림 6은 GPS E축에 대해 나타낸 모니터링 변화량이다. 그림 7은 GPS Z축에 대해 나타낸 모니터링 변화량이며, 이들 그림에서 변화량의 전체적인 추이를 파악하기 위해서 회귀곡선을 각각의 그림에 변화량과 동시에 나타내었다.

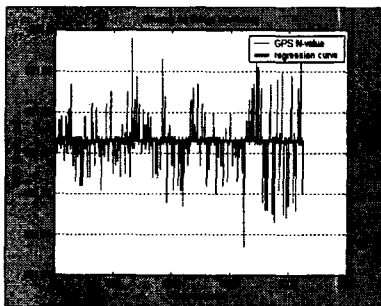


그림 5. GPS N축

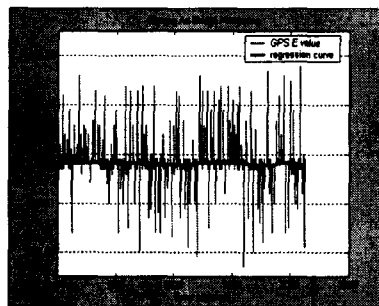


그림 6. GPS E축

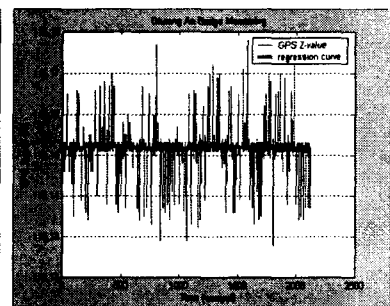


그림 7. GPS Z축

가속도계의 관측값은 IMU 장치에 의해 관측된 자세 및 가속도 그리고 회전율을 이용하여 각각의 축 방향에 대한 가속도값을 추출하였으며, 이들 가속도값들은 각각의 축 방향에 대해 그림 8 ~ 그림 9에

나타내었다. 각각의 그림에서 최고 상부 그림은 가속도 자체값(m/s^2)을 나타내며, 중앙 그림은 가속도의 값을 1차 적분하여 나타낸 속도(m/Hz)이고, 하부 그림은 1차 미분한 속도를 재차 적분한 즉, 가속도값을 2차 적분하여 나타낸 구조물의 변위(mm)를 나타내고 있다. 이들 관측값들은 IMU 자체에 내장되어 있는 Kalman filter 알고리즘에 의해 1차 보정된 값들이기 때문에 이들 값들은 단지 온도 변화에 대해 오차 처리부분에서 처리되어야 한다.

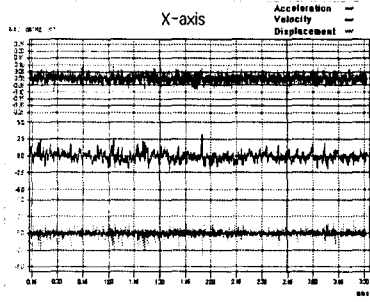


그림 8. IMU N축

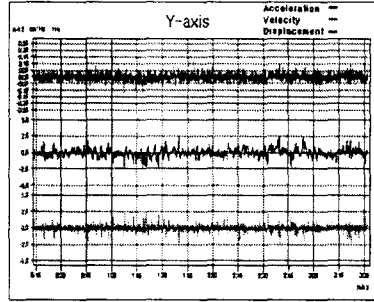


그림 9. IMU E축

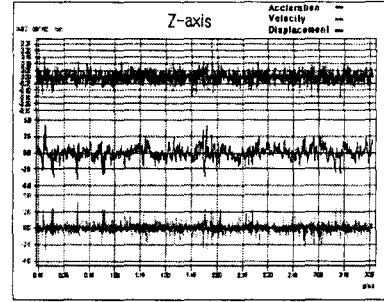


그림 10. IMU Z축

3.3 통계적 다변량 분석

본 연구에서 개발된 RTK GPS에 의한 모니터링 프로그램은 먼저 입력된 위치값과 차후 입력된 위치값을 계산하여 자동으로 연산되면서 기준 좌표값과 상·하한계값을 나타내도록 프로그램되었다. 그러나 이 프로그램은 단지 실제 현장에서 사용되는 모니터링 값이므로 이를 정확하게 연산되도록 프로그램화하여야 한다. 따라서 수학적 연산이 가능한 matlab 프로그램을 이용하여 통계적 다변량 연산을 설계하여 예상되는 모니터링 값의 편차와 발견 한계치를 선택하여야 한다. 두개의 GPS 벡터(GPS N & GPS E), 두개의 풍속벡터(UE & UW), 두개의 가속도 반응 벡터(δE & δN) 그리고 하나의 온도 벡터(T) 등 총 7개의 변수를 이용하여 실험되었다. 여기서, 각각의 변수에 대한 평균과 공분산 행렬은

$$\bar{X}_{1112} = \begin{bmatrix} -0.0000 \\ 0.0000 \\ 1.0805 \\ 2.3444 \\ 0.0000 \\ -0.0000 \\ 27.5608 \end{bmatrix} \quad S_{1112} = \begin{bmatrix} 0.6032 & 0.0629 & 0.0370 & -0.0610 & -0.0113 & 0.3527 & -0.0013 \\ 0.0629 & 0.4124 & 0.0526 & -0.0837 & 0.0415 & 0.4964 & 0.0185 \\ 0.0370 & 0.0526 & 0.5193 & -0.1591 & -0.0568 & 0.2214 & 0.0541 \\ -0.0610 & -0.0837 & -0.1591 & 4.3636 & -0.7976 & -5.6269 & -0.0089 \\ -0.0113 & 0.0415 & -0.0568 & -0.7976 & 0.6098 & 2.4919 & -0.0675 \\ 0.3527 & 0.4964 & 0.2214 & -5.6269 & 2.4919 & 16.7699 & -0.0731 \\ -0.0013 & 0.0185 & 0.0541 & -0.0089 & -0.0675 & -0.0731 & 0.0939 \end{bmatrix}$$

이고, 여기서 $m=1000$, $p=7$ 이다. 다변량 제어 차트는 알맞고, 제어한계와 통계치는 다변량 제어 차트를 구성하는데 필요하다. 그러므로 $\alpha = 0.01$ 을 이용한 상·하한계 제어값은 다음과 같다.

$$LCL = \frac{(1000 - 1)^2}{1000} \times \frac{(7/(1000 - 7 - 1)) \times 0.1445}{1 + (7/(1000 - 7 - 1)) \times 0.1445} = 1.0166$$

$$UCL = \frac{(1000 - 1)^2}{1000} \times \frac{(7/(1000 - 7 - 1)) \times 2.9217}{1 + (7/(1000 - 7 - 1)) \times 2.9217} = 20.1600$$

그림 11은 다변량 제어 차트를 이용하여 7개 변수의 전체 변위들에 대한 이상치를 알 수 있다.

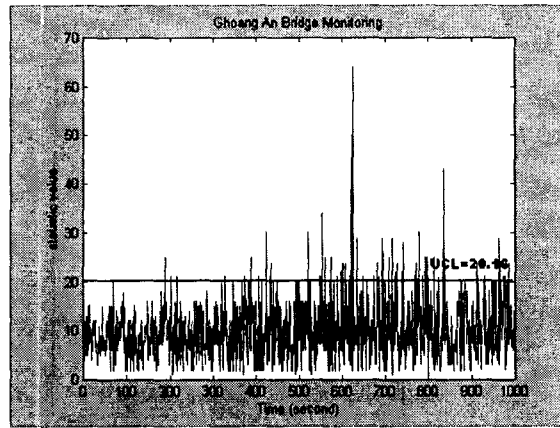


그림 11. 백터값에 대한 다변량 한계값

4. 결론

본 연구에서는 RTK GPS 방법과 관성항법장치인 IMU를 이용하여 현수교 주탑의 거동을 관측하였다. 먼저 RTK GPS 방법의 모니터링 정확도를 분석하였고, 이를 바탕으로 RTK GPS를 이용한 모니터링 시스템을 개발하고 IMU를 이용한 모니터링 결과와 비교하였다. 본 논문의 연구결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. RTK GPS기법을 적용하여 동일 안테나에 연결된 이동국에서 좌표값을 연속적 관측 결과에 대해 수신기 잡음과 다중경로 오차를 제거하여 IMU 가속도값과 비교한 결과, 각 축방향 변위차가 1mm정도로서 RTK GPS기법을 이용한 구조물 모니터링 측량이 가능함을 알 수 있었다.

따라서 RTK GPS에 의한 구조물 모니터링의 정확도를 향상시키기 위해서는 무선통신의 출력범위, 빠르고 정확한 미지정수 결정, GPS를 비롯한 관성센서 오차에 대한 정확한 분석의 발전에 따라 향후 더욱 효율적인 원격 모니터링 시스템의 구축이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- Guo, J. & S. Ge, "Research of displacement and frequency of tall building under wind loading using GPS", *10th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation*, Kansas City, Missouri, September 16 ~ 19, 1997, pp. 1385 ~ 1388.
- Cox, M. A. A., "Control charts on spreadsheets: A tutorial guide or poor man's persuader", *Quality Engineering*, 1989, pp. 135 ~ 155.
- Hawkins, M. D. & D. H. Olwell, "Cumulative Sum Charts and Charting for Quality Improvement", *Berlin/Heidelberg: Springer Verlag*, 1998, pp. 240 ~ 247.
- Ogaja, C., "On-line GPS integrity monitoring and deformation analysis for structural monitoring application", *14th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation*, 2001, pp. 989 ~ 999.
- Ogaja, C., C. Rizos, J. Wang & J. Brownjohn, "Towards the implementation of on-line structure monitoring using RTK GPS and analysis of results using the wavelet transform", *10th FIG Int. Symp. on Deformation Measurements*, Orange, California, March 19 ~ 22, 2001, pp. 284 ~ 293.
- Barbara G. T. and Linda S. F., "Using Multivariate Statistics", 2nd ed., Harper & Row, New York, 1989, p. 746.
- Joe, H., "Multivariate Models and Dependence Concepts", Chpman & Hall, London, New York, pp. 369 ~ 399.