



人工衛星에 의한 測地網의 結合

Combination of Geodetic Net by Artificial Satellite

李 啓 鶴*
Lee, Kye Hak

1. 序 論

世界各國의 測地系는 유럽이나 미국 大陸과 같은 상당히 넓은 地域에서는 三角測量의 直接 結合에 의해 統一되고 있다. 이 경우는 鉛直線 偏差만큼이 아니고 準據橢圓體(reference ellipsoid)의 모양과 크기로 통일되어 있다. 그러나, 大陸間, 大洋속의 섬과 섬, 섬과 大陸 등의 結合은 측지계의 중간의 上空으로부터 파라슈트에서 마그네슘·플래어를 낙하시키고, 그 閃光을 양측의 三角點數點으로부터 동시에 測角하는 플래어 三角測量法(노르웨이와 덴마크의 結合), 航空機로부터 發信한 電波의 經路時間으로부터 距離를 구하는 하이란(HIRAN)法(북구와 북미, 카리브海諸島와 남미, 하와이 諸島의 結合)에 의해 一部가 結合된 것외에는, 거의 결합되어 있지 않다.

또, 달에 의한 별의 掩蔽, 혹은 日食의 이용 등을 시도했지만, 충분한 精度를 얻을 수 없었다. 그러나 人工衛星의 出現에 의해 처음 세계의 統一測地座標系를 確立한다는 국제적인 測地網의 結合이 시작되고, 장시간 測地學의 꿈이었던 세계의 統一測地網이 실현될 가능성이 생겼다.

人工衛星은 地球의 重力場에서의 運動때문에, 그 軌道의 변화로부터 地球의 重力場 및 形狀을

검토할 수 있다. 이 人工衛星에 의한 測地測量의 利點으로는

- ① 長距離間의 測地結合이 가능하다.
- ② 重力場의 情報를 얻을 수 있다 등을 들 수 있다.

2. 測地原子의 統一

測地의 三角測量에서는, 出發點(測地原點: geodetic datum origin)에서 經度, 緯度, 方位角, 높이 및 三角點의 基準面이 되는 準據橢圓體의 모양과 크기 등 測地原子(geodetic datum)中, 經度, 緯度, 方位角은 天文觀測에 의해 구하는 것이 보통이다.

따라서, 測地原點에서 觀測한 天文經度, 天文方位角은 測地原點의 각각의 測地經度, 測地緯度, 測地方位角과 같이 해서, 三角測量을 하고 있다. 天文觀測은, 測點에서 鉛直線을 基準으로 하고 있지만, 이 鉛直線은 그림 1.(a)의 重力의 方向이고, 重力은 地球의 引力과 遠心力외에 地形이나 地下物質 등의 影響을 받고 있으므로, 回轉橢圓體(ellipsoid of nevolution)에 대한 法線方向과 같은 단순한 幾何學的關係가 아니다. 이와같은 차이가 있지만, 測地原點에서는 天文位置를 測地位置와 같다고 보는것은 測地原點에

*測地技術士. 工博. 湖南大學校 工科大學 教授(産業技術研究所長)

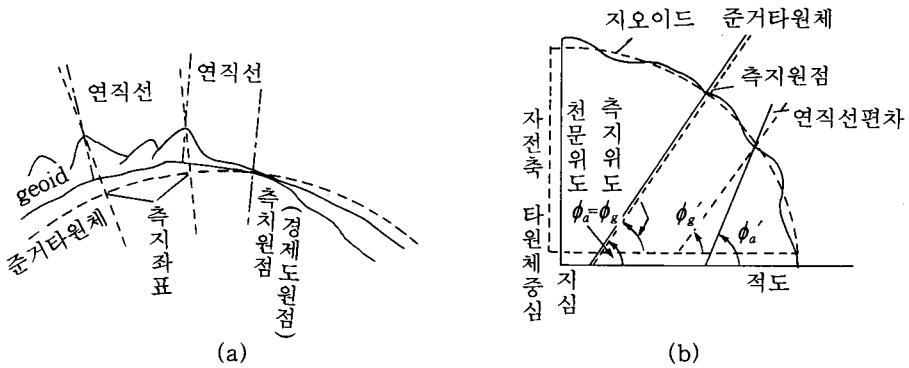


그림 1 준거타원체와 지오이드, 연직선편차의 관계

서 지오이드와 準據橢圓體는 겹하고 있다고 가정하고 있기 때문이다. 즉, 鉛直線偏差는 제로로 하고 있다.

이와 같이 해서 출발한 三角網의 각각의 三角點에서 觀測을 해나가면, 天文, 測地의 位置의 차이로부터 그 점에서의 鉛直線偏差가 구해진다 (그림 1). 이것은 지오이드와(geoid) 준거타원체의 기울기이다. 따라서 이 경향이 미치는 곳에서 구하면, 어느 넓은 領域에서의 準據橢圓體에 대한 지오이드의 起伏이 구해진다.

測地系는 各國獨自의 測地原點으로부터 출발한 것이 많기 때문에, 境界點에서는 이중의 값이 얻게 된다. 이것을 없애기 위해 한쪽의 測地原子를 다른 測地原子로 통일하여 고치면 되고, 유럽대륙이나 미국대륙에서는 이미 상당히 넓은 지역이 이와같은 三角測量의 直接連結에 의해 통일되고 있다. 그러나, 三角測量의 結合可能的距離는 최고 70km까지 이므로, 大陸間, 大洋中の 섬과 섬, 섬과 大陸間의 結合은 매우 困難했지만, 최근, 衛星三角測量(Satellite triangulation)에 의한 結合이 檢討하게 되었다.

3. 人工衛星 運動의 要素

人工衛星은 地球를 약 100분에 1周하고, 地球

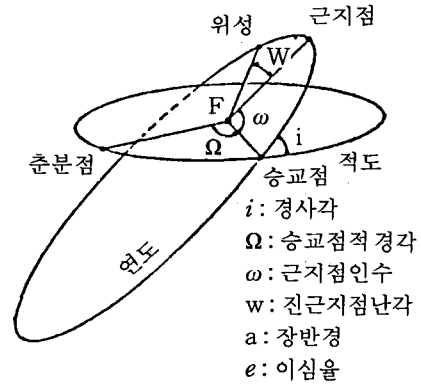


그림 2 위성의 위치 및 운동을 표시하는 요소

위에서 보면, 地球自轉때문에 同一衛星의 軌道 아래를 1日 2回 通過한다. 地球全體로부터 보면, 1일에 적어도 4회는 同一衛星이 通過하게 된다.

衛星은 일반적으로 地球의 중심을 焦點으로 하는 橢圓軌道上을 運動한다. 그 軌道는 赤道面과의 交角 i 를 傾斜角, 赤道面과 軌道面과의 交角中, 衛星이 남쪽에서 북쪽으로 이동하는 點을 昇交點이라 하고, 昇交點과 春分點, 昇交點과 近地點과 衛星이 地球中心에서 이루는 角을 昇交點赤經角 Ω , 近地點引數 ω 및 眞近地點離角 W 라는(그림 2) 4개의 要素가 있고, 이것에 衛星의 橢圓軌道의 長半徑, a 및 離心率 e 를 더한것을 6要素라고 한다. 이 6要素를 알면, 衛星의 位置 및 運動을 알 수 있다.

그러나, 地球의 重力場이 球對象으로 地球重力以外에 힘이 작용하지 않으면 6要素 중에 W 를 제거해서 모두 일정하게 되지만, 실제로는 地球의 重力場은 球形이 아니고 扁平한 모양을 하고 있고, 또 大氣의 抵抗을 받기 때문에 각 要素는 時間과 함께 變化한다.

4. 人工衛星에 의한 測定法

衛星을 航法에 利用하는 測定法은 다음과 같다.

1) 距離測定法

衛星까지의 距離를 측정하면 測點은 衛星을 중심으로한 距離를 半徑으로하는 球面과 地球表面과의 交線上에 있고, 線의 位置가 求해진다. 距離의 測定에는 衛星과 測定에 精密한 時計를 놓고 電波의 到着時間을 測定하는 方法, 트랜스폰더(transponder : 電波의 送受信을 自動적으로 반복하는 裝置)에 의한 方法, 레이저(laser)에 의한 方法 등이 있다.

2) 方位測定法

衛星으로부터 電波를 受信하고, 그 方位를 測定하는 方法으로, 이것에 의한 線의 位置는 等方位曲線이 된다. 적도상의 正지위성을 이용하면 線의 位置는 計算에 의해 구할 수 있다. 方位測定法은 電波六分儀, 無線方位測定機, 레이저를 衛星의 反射器에 의하여 측정하는 方法 등이 있다.

3) 仰角測定法

衛星의 仰角 α 를 재서 線의 位置를 정하는 方法으로 衛星의 高度 h 가 地球半徑 r 보다 작은 경우, 衛星 바로 밑 點까지의 距離 D 는

$$D = hcot\alpha$$

로 구하고, h 가 큰 경우는

$$\frac{cot(\alpha+\theta)}{r} = \frac{cot\alpha}{r+h}$$

에 의해, 衛星과 地球中心을 맺는 線이 測點과 地球中心을 맺는 線과 이루는 角 θ 를 구하

면, $D = r\theta$ 에 의해 位置의 線이 求해진다.

4) 距離變化率測定法

衛星이 送信하는 一定周波數의 電波를 측정하면, 도플라·쉬프트(衛星이 가까우면 受信周波數는 높은 쪽으로, 멀어지면 낮은 쪽으로 기운다)에 의해 생긴 周波數의 偏移로부터 距離를 구하는 方法이다. 衛星으로부터의 送信周波數 f , 波長 λ , 距離 r , 光速을 c 라고 하면, 周波數의 偏移 Δf 는

$$\Delta f = \frac{f}{c} \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dr}{dt}$$

이 된다. 또, 測點과 衛星을 맺는 線이 軌道를 이루는 角을 β , 衛星의 速度를 v 로 하면

$$\frac{dr}{dt} = v\cos\beta$$

가 된다. 따라서, 周波數變化의 測定은 距離變化 및 β 의 測定이 되고, 測點은 角 β 의 圓錐상에 있다. 이것과 地平面과의 交線은 雙曲線이 되고, 地平面上에 線의 位置가 求해진다.

5. 衛星三角法

從來 이용하고 있는 地點의 測地的 結合方法인 플레어(flare) 三角測量은 거리에 제한(300km가 限度로 되어 있다)이 있는 것, 파라슈트(parachute)가 바람에 흐르는 영향도 있다.

하이란法은 쇼란(shgran)法을 改良한 方法으로 精度는 높지 않다. 또, 近地天體인 달에 의한 별의 掩蔽를 이용한 測地結合은 觀測에 好條件의 掩蔽가 적을뿐만아니라, 氣象에 左右되어 2點間에서의 同時成功이 곤란하기 때문에 그다지 能率的인 方法이라고는 말할 수 없다.

人工衛星은 달보다 상당히 地球에 가까우므로, 2點間으로부터의 方向에 큰 差가 나오는것, 그리고 光點으로 보이기 때문에 觀測하기 쉬운 特徵을 갖고 있다. 衛星三角測量은 掩蔽와 같은 天球座標曆表값에 의하지 않고, 플레어 三角法을 擴張한 3次元三角測量方式이 사용된다.

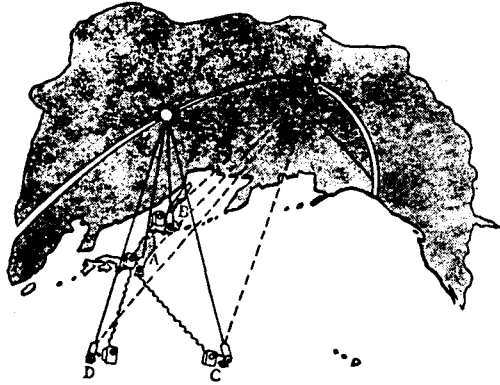


그림 3 위성삼각법원리

그림3에서, 地表 A 및 B로부터 위성의 방향을 동시에 별을 배경으로 해서, 寫眞赤道儀에 의해 撮影 혹은 觀測을 하면, 별의 天球上의 위치가 赤道座標에 正確하게 있으면, 이것을 기준으로 해서 點 A, B로부터 觀測方向의 天球上에 위치를 구할 수 있다.

즉, 恆星을 背景으로 한 衛星의 光跡을 撮影해서, 光跡의 위치와 그 時刻를 알면, 衛星의 赤經, 赤緯는 背景의 별과의 比較로 부터 구할 수 있다.

따라서 地球의 自轉에 의한 地球赤道座標의, 天球赤道座標에 대한 回轉量을 補正하면, 定位置에 있는 點 A를 地球에 固定한 天球上에 確정한 2點 A, B를 포함하는 平面이 결정된다.

다음에 衛星의 別途의 位置에 대해서 A, B兩點으로부터 同時觀測을 하면, 別途의 平面을 동시에 결정할 수 있다. 點 B는 또 이 面上에 있기 때문에, 이들 2平面의 交線으로부터 AB의 空間의 方向이 구해진다. 또 BD, CA, BD, CD 등의 空間의 方向도 같은 식으로 구하면, 三次元的 測地網의 形狀이 생긴다. 이 測地點에는 地上三角測量의 경우와 같이, 적어도 一邊의 基線의 距離測量이 必要하다.

比較的 낮은 高度의 衛星을 이용한, 數 100km의 邊長을 갖는 測地網의 設定에 廣瀨의



다른 관측에 의한 위치의 선

그림 4 비적법

飛跡法(Hirose's trailing method)이 있다. 이것은 그림4.의 A, B가 하나의 測地系의 既知點이고 C가 未地點으로 하면 A에서 어느 時刻의 衛星의 位置를 별과 함께, 또 B, C는 衛星의 飛跡만을 별과 함께 赤道儀로 撮影해 놓는다.

點 B와 天球上에 撮影된 衛星의 飛跡을 포함하는 面과, 天球에 撮影된 衛星의 位置를 맞는 直線과의 交點은, 觀測時刻의 衛星의 位置이고, 計算으로 구할 수 있다. 다음에 點 C에서 觀測된 天球上의 衛星의 飛跡과, 이미 位置를 알고 있는 衛星을 포함하는 面을 구하고, 이것과 A, B가 속하는 測地系의 橢圓體와의 交線은, C點을 포함하는 線의 位置를 나타내고 있다. 같은 모양의 觀測을 다른 衛星에 대해 行하면, 다른 위치의 線을 구할 수 있고, C 點의 位置는 그들의 交點으로 구할 수 있다. 그리고 多數의 觀測을 행하면, C點의 높이가 구해지고, 未地點의 三次元的 位置가 確立된다.

以上과 같이, 人工衛星에 의해 測點의 相互位置를 구하는 方法은, 各 測點의 位置가 매우 떨어져 있어도, 相互關係는 鉛直線 偏差 등의 地球의 物理的인 因子가 포함되지 않은 純幾何學的인 特징을 갖는다.

6. 衛星의 軌道解析에 의한 地球의 形狀

地球의 重力포텐셜은, 自轉軸에 대한 對稱이라 가정하면, 緯度の 函數로서

$$U = \frac{GM}{r} \left\{ -1 \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{R}{r} \right)^n P_n(\sin\phi) \right\} \quad (1)$$

로 나타낸다.

여기서, G 는 重力의 定數, M 은 地球의 質量, r 은 地心距離로, 右邊 第1項의 GM/r 은 地球가 球인 경우의 重力포텐셜이다. 또 J_n 은 定數, R 은 地球의 赤道半徑, P_n 은 式(2)의 Z 를 $\sin\phi$ 또는 $\cos\phi$ 로 할때, 式(2)에 나타나 있는 n 次의 루잔돌多項式(로드리게스公式)이다.

$$P_n(Z) = \frac{1}{2^n n! dZ^n} (Z^2 - 1)^n \quad (2)$$

예를들면, $P_0(Z)=1$, $P_1(Z)=Z$, $P_2(Z)=(3Z^2-1)/2$, $P_3(Z)=(5Z^3-3Z)/2$ ……라는 簡單한 函數를 가리키고 있다. 式(1)에서 赤道面에 관한 地球의 形이 對稱이라 하면, 홀수次의 項은 소거한다. J_n 의 크기는 $n=2$ 에서 10^{-3} , 다른 n 에 대해서는 10^{-6} 그 以下이다. 짝수次의 J_n 은 赤道의 증가를, 홀수次의 J_n 은 南北의 非對稱性을 나타낸다. 즉, 地球面上的의 任意의 點(r, ϕ, λ)에서 重力포텐셜 U 는, 係數 J_n 을 알면 式(1)로부터 計算이 가능하다. 따라서, 地球의 重力場을 適切하게 表現할 수 있는가는 이 係數의 定하는 方法에 달려있다.

이 係數는 J_n 地球의 質量分布에 좌우되지만, 그것을 미리 알고 있지 않기 때문에, 重力을 各地에서 測定하든가, 혹은 人工衛星의 觀測에 의한 方法에 의해 구할 수 있다.

一般적으로 式(1)에서 포텐셜이 주어지는 경우의 衛星의 運動은 6개의 軌道要素, 즉 i =軌道面이 赤道面과 이루는 傾斜角, Ω =昇交點赤經角, a =軌道橢圓의 半長經, e =軌道橢圓의 離心

率, ω =近地點引數, u =眞近地點離角에서 指定된다. 그러나 衛星의 運動에는, 地球의 大氣의 抵抗, 太陽光線의 輻射壓, 달이나 太陽의 引力, 地球磁場 등의 影響이 複雜하게 들어가 있어, 軌道는 微妙하게 變化한다. 이것을 軌道の 攝動(Perturbation)이라 한다. 攝動은 軌道の 6要素로 작고 느릿하게 變化하는 것을 나타낸다.

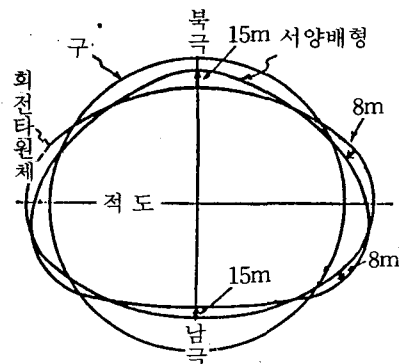
따라서, 衛星의 軌道解析으로부터 測地的인 情報를 빼내기 위해서는, 軌道를 장기간에 걸쳐서 連續적으로 觀測해야 한다. 이와 같이 해서 얻은 軌道要素의 變化로부터, 大氣의 影響이나 月·太陽의 引力의 影響 등을 제외해서 地球의 모양에 의한 影響만을 얻어내고, 이로부터 J_n 의 값을 정한다. J_n 과 地球의 모양과의 關係는 天體力學의 理論으로부터 구할 수 있다.

東京天文台는 13개의 衛星을 사용하여 地心重力定數 $GM=3.986032 \times 10^{20} \text{ cm}^3/\text{sec}^2$, $R=6,378,165 \times 10^8 \text{ cm}$ 로서

$$J_2=1082.645 \times 10^{-3}, J_3=-2.546 \times 10^{-6}$$

$$J_4=-1.649 \times 10^{-6}, J_5=-0.210 \times 10^{-6}$$

등의 값을 구하고 있다. 1964년 國際天文學聯合(IAU)은 $J_2=-1082.7 \times 10^{-3}$ 을 채용했다. 이로부터, 橢圓體의 扁平度는 $1/298.25$ 가 된다. 그리고, $f=1/298.25$ 를 適用하고, 종래의 測地測量



| 그림 5 서양이형의 지구

의 결과를 計算하여 고치고, 이것에 레이더 (rader)에 의한 달의 距離測定의 結果 등을 加味해서, IAU는 地球의 赤道半徑으로서 $a=6378.160\text{km}$ 를 채용했다.

$a=6378.160\text{km}$, $f=1/298.25$ 에 해당하는 地球의 形과 크기는, 現在 가장 신뢰할 수 있는 값이고, 1967년의 IUGG에서도, 今後 學術用으로서 채용되는 것을 고려하고 있다.

J_2 의 값은 J_4 까지 구할 수 있게 되었다. 이 J_{13} 의 값을 이용하여, $f=1/298.25$ 의 回轉橢圓體에 대한 지오이드의 偏差를 구하면 그림5.에서 보

이는 바와 같이 北極에서 15m 높고, 北半球中緯度에서 8m 낮으며, 南半球中緯度에서는 역으로 8m 높아지고, 南極에서는 17m 낮아지는, 소위 西洋梨型의 橢圓體를 이루고 있다.

또, 人工衛星의 軌道觀測에 의해, 從來 U 의 帶球函數의 展開 뿐만아니라, 極軸에 대해서 對稱이 아닌 成分인 重力포텐셜面의 凹凸을 구할 수 있다. 이 人工衛星의 데이터를 이용해서 지오이드의 높이를 구한 그림6.의 kaula(1962)에 의한 지오이드는 有名하다.

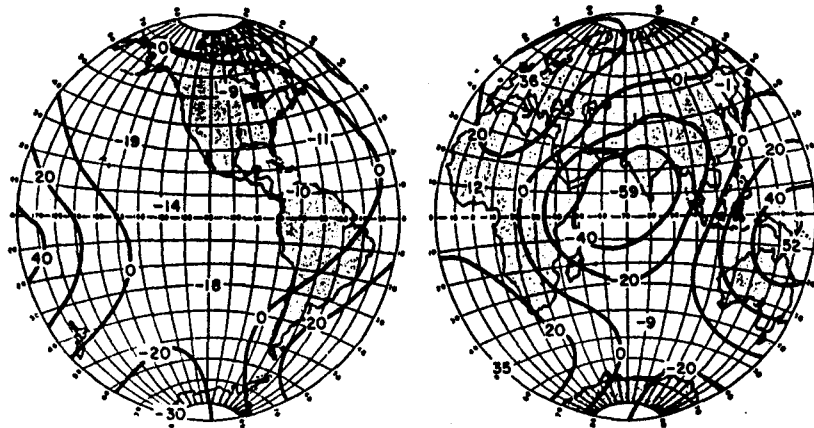


그림 6 Kaula에 의한 지오이드