

DE405를 이용한 태양계 천체력 계산 SOLAR EPHEMERIS BY DE405

김효령, 노덕규, 정현수, 정재훈, 조세형, 안영숙
한국천문연구원, 대덕전파천문대

HYO RYOUNG KIM, DUK GYOO ROH, HYUN SOO CHUNG, JAE HOON JUNG,
SE HYUNG CHO, AND YOUNG SOOK AHN

Taeduk Radio Astronomy Observatory, Korea Astronomy Observatory
E-mail: hrkim@rao.re.kr

Received 2001 Nov. 28; Accepted 2001 Dec. 21

ABSTRACT

The DE405 ephemeride is introduced as TRAO solar ephemeris system to support the apparent coordinates of planets after 2000. The time delay between planets and observer has to be regarded to get the apparent position of planet. Some fast algorithms about time delay are suggested to reduce the computing time. The CSI method is applied to run these algorithms on any O/S including both real-time and run-time machine.

Keywords: astrometry – ephemerides

I. 서 론

대덕전파망원경에서는 14미터 전파망원경의 효율을 측정하기 위하여 태양계의 구성원가운데 달, 목성, 토성 및 금성을 이용하여 왔다. 전파망원경을 이용하여 이들을 관측하기 위해서는 별도의 태양계 천체력이 지원되어야 하며, 이제까지는 USNO에서 제공하는 데이터를 사용하여 왔다. 그러나, 이 데이터는 2000년 1월 1일 이후의 데이터는 지원하지 않으며, 또한 비슷한 포맷을 갖는 데이터로서도 더 이상 지원되지 않고 있다. 따라서, 2000년 이후의 태양계 구성원들의 천체좌표를 계산하기 위하여 새로운 천체력 계산 방식을 도입하기로 하였으며, JPL에서 제공하는 DE405를 이용하기로 하였다. DE405를 이용하여 태양계의 천체력이 계산되면서 각 구성원들의 상대속도에 의한 도플러 효과 보정이 가능하게 되었으며, 연속파 관측에만 활용되어오던 태양계 행성들에 대한 전파관측에서도 스펙트럼 관측이 지원 가능하게 되었다.

DE405는 IAU1996 CRS(Celestial Reference System)를 기준좌표계로 사용함에 따라, 이 좌표계와 시간에 대한 간략한 설명 및 사용법은 Kaplan et al. (1989)의 것을 따랐으며, 또한 사용하는 시간이 TDB(Barycentric Dynamical Time)라는 가상시간을 사용함에 따라, 이 시간을 계산하는 방법도 2절에 기술하였다.

3절에서는 JPL에서 제공하는 DE405를 이용하는 프로그램의 내용중 지구의 좌표를 계산하는 과정을 간략하게 설명하였다.

4절에서는 행성의 겉보기 위치를 계산하기 위하여 고려

되어야 하는 시간지연을 구할 때, 반복대입 과정으로 인하여 발생하는 계산상 부하를 경감시키기 위하여 1차 근사에서 곧바로 최종적인 시간지연 값을 추정하는 방법을 제시하였다.

5절에서는 태양계 천체력의 계산을 일정한 오차 수준에서 빠른 속도로 수행하기 위하여 Cubic Spline Interpolation 방법을 이용하는 방법을 설명하였으며, 행성의 겉보기 위치 계산에서 고려되는 시간지연을 근사적으로 다루는 방법을 제시하였다.

II. DE405에서 사용하는 좌표계와 시간

DE405에서 사용하는 좌표계는 IAU1996 CRS이다. 이 좌표계는 J2000(J2451545.0일, 2000년 1월 1일 12시)에서 정의된 것이며, 원점은 J2000 때의 태양계의 질량중심점이며, x 축은 춘분점을 지향하고, z 축은 천구의 북극을 향하며, xy 평면은 지구의 적도면과 평행한 면을 사용한다(Kaplan et al. 1989). DE405에서 사용하는 시간척도는 TDB라는 가상시간을 사용한다. 우리가 일상적으로 사용하는 시보인 UTC로부터 TDT(Terrestrial Dynamical Time)를 구하고, 이 TDT로부터 TDB 시간을 계산한다. 일상적인 시보인 UTC에서 TDT를 구하고 다시 이 TDT를 이용하여 TDB 시간을 계산하는 순서는 다음과 같다(IERS, <http://maia.usno.navy.mil/>).

$$TAI = UTC + DTAI \quad (1)$$

$$TDT = TAI + 32^{\circ} \cdot 184 \quad (2)$$

DTAI는 윤초에 의해 발생한 UTC와 TAI 사이의 시간차이다. 관측할 일자의 줄리안 일수를 J 라고 하면, 이에 해당되는 TDT 시간을 일자로 나타내면 다음과 같다.

$$t_{TDT} = J + TDT/86400 \quad (3)$$

TDB 시간은 TDT로부터 이론적으로 계산되는데, 여기에 필요한 몇 개의 값은 다음과 같이 결정된다.

$$T = (t_{TDT} - J2000)/36525 \quad (4)$$

$$m = (357.5 + 35999.1T) \times 2\pi/360 \quad (5)$$

$$s = 0.001658 \sin(m + 0.01671 \sin m) \quad (6)$$

$$t_{TDB} = t_{TDT} + s/86400 \quad (7)$$

T 은 $J2000$ TDT로부터 줄리안 100년 단위의 경과시간이며, m 은 지구의 평균 근점이각이다. s 는 TDB와 TDT 사이의 시간차이며, 달, 근접 혜성이나 소행성이 아닌 경우 $s \approx 0$ 으로 근사해도 된다(Kaplan et al. 1989).

III. 지구중심 좌표 구하기

태양계 행성의 좌표를 구하기에 앞서, 요구된 TDB 시간에 해당되는 지구의 좌표를 먼저 구한다. 여기에서 지구의 좌표는 지구중심의 좌표를 의미한다.

DE405에서 지구의 좌표가 계산되는 과정을 살펴보면, DE405는 지구중심의 좌표를 직접 제공하지 않고 있으며, 지구달 계의 질량중심 좌표와 지구에서 달까지의 상대좌표만을 제공한다. 따라서, 지구-달 계의 좌표를 R 이라 하고, 달의 지구에 대한 상대좌표를 r 이라 할 때, 지구의 좌표는 $R - r/(1+\eta)$ 와 같이 계산된다. 여기에서 η 는 지구와 달의 질량비이며 DE405에서 사용하는 값은 $\eta = 81.3005601$ (DE405 헤더 파일 참조).

IV. 태양계 행성의 걸보기 좌표 구하기

지구이외의 태양계 구성원의 좌표는 주어진 TDB 시간에서의 값이 아닌, 시간지연이 고려된 과거의 위치를 계산하여야 올바른 걸보기 좌표가 된다.

먼저, 주어진 t_{TDB} 시간에서의 행성의 좌표 $x(t)$ 를 계산한다. 지구로부터의 상대거리를 계산하고 이 거리를 빛이 달린 시간으로 계산하여, 지연되는 시간 τ 를 계산한다. 시간지연이 고려된 새로운 과거의 위치 $x(t-\tau)$ 를 계산한 뒤, 다시 이 위치에서의 새로운 시간지연 τ 를 계산하여 τ 에 대입하는 계산과정을 반복하면 4-5회 이내에 만족할 만한 값에 수렴하게 된다.

시간지연이 고려된 걸보기 위치를 구하는 과정은 반복대입 과정을 거쳐 계산되어야 하기 때문에, 이러한 반복계산에 소요되는 시간은 관측프로그램에 있어서 무시못할 계산상 부하를 초래한다. DE405에서는 행성의 위치와 속도를 계산

하여 제공하기 때문에 이들을 이용하여 처음 TDB 시간에 계산된 위치와 속도를 이용할 경우 근사된 시간지연을 다음과 같이 계산하여 사용할 수 있다. 행성의 위치와 속도를 \vec{x}_p, \vec{v}_p , 지구의 위치를 \vec{x}_e 라 하고, 행성의 지구에 대한 거리를 $d = \vec{x}_p - \vec{x}_e$ 라 하고, 이때의 시간지연을 $\tau = d/c$ 라 할 때, 최종적인 시간지연 τ' 은 다음과 같이 계산된다.

$$\tau' = \tau [1 - 2\beta_r + \beta^2]^{1/2} \quad (8)$$

여기에서 $\vec{\beta} = \vec{v}_p/c$, $\beta_r = \vec{\beta} \cdot \vec{d}/d$ 이며 c 는 빛의 속도이다. 이렇게 근사된 최종 시간지연 값을 사용하면 단 2회의 계산으로 행성의 걸보기 위치와 속도를 계산할 수 있다.

V. Cubic Spline Interpolation 방법을 이용한 근사값 구하기

태양계 천체력을 계산하는 과정은 걸보기 위치를 구하는 과정에서 반드시 시간지연을 고려해야만 한다. 앞에서 기술한 시간지연 계산과정을 이용하여 계산에 소요되는 시간을 어느 정도 줄일 수 있더라도, 이와같은 계산과정을 매 초마다 하기에는 아직도 계산상 부하가 큰 편이어서, 위의 과정을 그대로 실제 관측과정에 구현할 경우, 과중한 계산 부하를 발생시킨다. 따라서, 어느 정도의 계산 오차를 수용하고, 계산상 오차값이 그 이하를 만족시킬 수만 있다면, 임의의 두 시간에서의 좌표를 계산한 뒤, 두 시간 사이의 좌표는 이를 두 시간에서의 값들을 이용하여 적당한 근사 방법을 통해 계산하여 사용하는 것이 실제 응용에 있어서 여러가지 편리함을 제공할 수 있을 것이다.

DE405에서 계산되는 좌표는 시간, 위치 및 속도 성분을 갖는 (t, x, v) 데이터 형태를 갖는다. 따라서, 이러한 데이터를 근사적으로 계산하는데 CSI(cubic spline interpolation) 방법을 이용할 수 있다. CSI를 이용하여 행성의 좌표를 근사시키는 방법은 다음과 같다. 임의의 시간 t_1 과 t_2 에 각각의 위치와 속도를 갖는 데이터 $(t_1, x_1, v_1), (t_2, x_2, v_2)$ 가 있다고 할 때, $t_1 \leq t \leq t_2$ 에서의 위치와 속도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$x(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 \quad (9)$$

$$v(p) = (a_1 + 2a_2 p + 3a_3 p^2)/\Delta t \quad (10)$$

여기에서 각 계수는

$$\begin{aligned} a_0 &= x_1 \\ a_1 &= v_1 \Delta t \\ a_2 &= 3\Delta x - (2v_1 + v_2)\Delta t \\ a_3 &= -2\Delta x + (v_1 + v_2)\Delta t \end{aligned} \quad (11)$$

이며, $\Delta t = t_2 - t_1$, $\Delta x = x_2 - x_1$, $p = (t - t_1)/\Delta t$ 로 정의된 값들이다.

CSI 근사방법을 적용함에 있어서, 지구의 경우는 시간지연이 고려되지 않기 때문에 적용에 별다른 어려움이 없지만, 지구이외의 행성의 경우 시간지연이 고려되어야 하며, 위의 CSI 근사방법을 이용할 경우 $t \rightarrow t - \tau$ 로 대체되어 사용되어

야 한다.

행성의 경우 $t \rightarrow \tau$ 라는 새로운 시간으로 CSI 방법을 적용 시킬 경우, 반드시 시간지연 τ 의 값을 먼저 알아야 한다. 위치와 속도의 CSI 근사방법에서 알 수 있듯이, 시간지연을 $(t, \tau, d\tau/dt)$ 의 형태로 만들 수 있다면, 똑같은 CSI 방법을 적용하여 임의의 시간에서 필요한 시간지연을 계산해낼 수 있다. 시간지연의 미분량은 시간지연을 단순히 시간에 따른 미분량으로 표현하면 되므로, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{c} [\vec{v}_p(t - \tau) - \vec{v}_e(t)] \cdot \frac{\vec{x}_p(t - \tau) - \vec{x}_e(t)}{|\vec{x}_p(t - \tau) - \vec{x}_e(t)|} \quad (12)$$

여기에서 $\vec{x}_p(t - \tau)$ 와 $\vec{v}_p(t - \tau)$ 는 시간지연이 고려된 행성의 위치와 속도, $\vec{x}_e(t)$ 와 $\vec{v}_e(t)$ 는 지구의 위치와 속도를 나타낸다. 따라서, 임의의 시간에서의 시간지연도 CSI 근사방법을 이용하여 구할 수 있게 되어, 새로운 위치에서의 행성의 좌표도 시간지연을 고려한 $t - \tau$ 시간에서 계산해낼 수 있다.

CSI 방법을 이용하여 지구와 행성의 좌표를 근사시키는 과정을 살펴보면 다음과 같다. 두 개의 시간 t_1 과 t_2 에서 CSI 근사방법을 적용할 데이터 값들을 구하였고, 시간이 t_1 에서 Δt 만큼 지났을 때, 즉 $t = t_1 + \Delta t$ 일 때: 지구의 경우, $p = \Delta t / \Delta t$, $\Delta t = t_2 - t_1$ 을 적용하고, 시간 지연의 경우 지구와 같은 경우로 적용되며, 행성의 경우, 앞서 새로이 근사된 시간 지연 τ 를 이용하여, $p = [\Delta t - (t - \tau_1)]/\Delta t$, $\Delta t = (t_2 - \tau_2) - (t_1 - \tau_1)$ 을 적용시킨다.

VI. 토 의

1) DE405를 이용하여 태양계 천체력을 계산하는 방법은 JPL에서 제공하는 소스 프로그램에 자세히 기술되어 있다. 이에 대한 자세한 설명은 해당 문서를 참고하여야 하겠지만, 여기에서는 지구의 좌표가 계산되는 과정을 간략히 설명함으로써 다른 부분의 이해를 돋고자 했다.

2) TDB 시간을 계산하는 과정에서 실제 변수는 UTC와 DTAI다. UTC는 일반 시보-우리가 일상적으로 사용하는 시계를 UT로 환산한 시간을 사용하면 된다. 다만 UTC와 TAI 사이의 시간차인 DTAI는 윤초와 관련되어 계속 증가하므로, DTAI의 값은 반드시 확인하고 사용하여야 한다. 현재 USNO의 IERS(International Earth Rotation Service)에서 DTAI를 포함한 시간 보정에 관한 여러 정보를 웹사이트에서 제공하고 있으므로, 수시로 이 사이트를 통하여 관련 데이터를 다

운로드 받아 사용하면 된다.

3) 행성의 걸보기 위치 계산에서 반드시 고려되어야 하는 시간지연을 근사하는 과정에서, β^2 항은 무시할만한 값이다. 지구의 경우 $v \approx 30 \text{ km/sec}$ 로 $\beta \approx 10^{-4}$ 정도의 값을 갖는다. 외행성의 경우 $v \propto 1/\sqrt{a}$ (a 는 장반경)로 근사되므로 β^2 항이 미치는 영향은 매우 적다. 실제 걸보기 위치에서 시간지연이 고려됨으로써 보정되는 각거리는 태양의 경우 $\sim 20''$ 정도이며, 목성의 경우 $8'' \sim 10''$ 정도이다. 이 정도의 보정은 대덕전파망원경의 구경이 14 m이므로 반드시 고려되어야 하는 양이다.

4) 행성의 걸보기 위치를 구하는데 있어 계산에 소요되는 부하를 줄이기 위하여 CSI 근사방법을 도입하였다. 행성의 좌표 계산은 지구와 달리 시간지연이 고려되어야 하며, 5절에서 살펴본 바와 같이 시간지연을 고려할 경우 시간축이 t 에서 $t - \tau$ 로 바뀌게 된다. 때문에, 관측시간이 Δt 만큼 지났을 때, 이에 해당하는 새로운 시간지연 τ 를 계산하여 사용하여야 한다. 새로운 시간지연을 구하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있으나, 가장 흔한 방법이 경과시간 Δt 를 일정하게 하는 방법이다. 이 방법은 시간지연을 따로 근사시키는 계산 과정을 생략하게 하지만, 어느 순간 한번 발생한 시간지연 오차가 다음 시간지연 계산에 그대로 전달되고, 결국에는 누적된 오차를 유발한다는 문제점이 있다. 대덕전파망원경 시스템의 주제어 컴퓨터인 Modcomp의 경우, 실시간 타스크 제어가 가능하여 경과시간을 일정하게 하는 방법이 어느 정도 가능하지만, 실시간 타스크 제어가 완벽하게 구현되지 않는 O/S에서는 사용하기에 위험한 방법이다. 반면에, 본 연구에서 제시된 시간지연 근사 방법은, 각 시간마다 새로운 시간지연을 계산하기 때문에, 설령 이전에 약간의 오차가 있었더라도 이후의 계산에 그 오차를 전달하지 않는다는 장점을 갖고 있다. 사실 이 계산방법은 실시간 타스크 제어가 지원되지 않는 O/S를 사용하는 컴퓨터에 적합하도록 제시된 것이다.

참고문헌

- Kaplan, G. H., Hughes, J. A., Seidelmann, P. K., & Smith, C. A. 1989, AJ, 97, 1197
- Lieske, J. H., Lederle, T., Fricke, W., and Morando, B. 1977, A & A, 58, 1
- Lieske, J. H. 1979, A&A, 73, 282
- McCarthy, D. D. 1996, IERS Conventions. IERS Technical Note 21, USNO