Моделирование процесса развёртывания космической тросовой системы, используя параллельные алгоритмы

О.Н. Наумов[1]

[1]Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Рассматривается процесс моделирования развёртывания космической тросовой системы, состоящей из базового космического аппарата и спускаемой капсулы. Космический аппарат и спускаемая капсула моделируются как твёрдые тела конечных размеров. Концевые тела соединены весомым тросом. Трос моделируется как совокупность твёрдых стержней. Отличительная черта данной работы в том, что здесь рассматривается параллельный подход к расчёту процесса развёртывания космической тросовой системы. Для описания вращательного движения концевых тел используются кинематические и динамические уравнения Эйлера. Для описания процесса развёртывания троса используется Второй Закон Ньютона.

1. Введение

Космические тросовые системы (КТС) представляют собой протяжённые объекты, состоящие из совокупности тел. В данной работе КТС состоит из двух твёрдых тел: космического аппарата (КА) и спускаемой капсулы (СК), а также из протяженного весомого троса. В работе рассматривается процесс развёртывания троса с борта КА.

Как правило, при рассмотрении динамики КТС, вводятся существенные допущения на геометрию концевых тел, на параметры троса. В большинстве случаев, трос считается невесомым, а концевые тела рассматриваются как материальные точки [1]. В данной работе приводится пример моделирования, где отсутствуют подобные допущения, и динамика системы рассматривается, как динамика двух твёрдых тел конечных размеров, соединённых весомым и гибким тросом [2]. Подобный подход позволяет значительно точнее оценить сложные эффекты влияния процесса развёртывания троса на движение относительно центра масс концевых тел, что в свою очередь, необходимо при оценке безопасности реальных космических экспериментов с тросовыми системами в будущем.

В данной работе трос рассматривается как распределённая система, данный подход позволяет оценить его собственную динамику, как гибкую связь между концевыми телами [3]. При моделировании трос заменяется совокупностью жёстких стержней конечной массы. Данный подход требует приведения непрерывной системы, которая в общем случае описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных к совокупности систем обыкновенных дифференциальных уравнений, которая описывает движения каждого дискретного участка троса. Из постановки задачи ясно, что чем большим числом дискретных участков мы заменим непрерывный трос, тем точнее будет расчёт его динамики. Но данный подход сопряжен с большой вычислительной сложностью, поэтому для моделирования динамики развёртывания КТС, предложен параллельный подход. Где расчёты множества участков распределяются по отдельным потокам, выполняющихся в параллельном режиме на разных процессорах.

2. Уравнения движения

Движения концевых тел, описывается уравнения Эйлера, которые принимают следующий вид:

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = \omega_{z_i} \cos\varphi_i + \omega_{y_i} \sin\varphi_i,$$

$$\frac{d\psi_i}{dt} = -\left(\omega_{y_i} \cos\varphi_i - \omega_{z_i} \sin\varphi_i\right) / \sin\alpha_i,$$

$$\frac{d\varphi_i}{dt} = \omega_{x_i} + \left(\omega_{y_i} \cos\varphi_i - \omega_{z_i} \sin\varphi_i\right) ctg\alpha_i,$$

$$J_{x_i} \frac{d\omega_{x_i}}{dt} + (J_{z_i} - J_{x_i})\omega_{y_i}\omega_{z_i} = M_{x_i},$$

$$J_{y_i} \frac{d\omega_{y_i}}{dt} + (J_{x_i} - J_{z_i})\omega_{z_i}\omega_{x_i} = M_{y_i},$$

$$J_{z_i} \frac{d\omega_{z_i}}{dt} + (J_{y_i} - J_{x_i})\omega_{y_i}\omega_{x_i} = M_{z_i}. \qquad (1)$$

где $\alpha_i, \psi_i, \varphi_i$ - углы Эйлера ($i = 1$- КА, $i = 2$- СК); $J_{x_i}, J_{y_i}, J_{z_i}$ - моменты инерции относительно связанных осей; $\omega_{x_i}, \omega_{y_i}, \omega_{z_i}$ - проекции угловых скоростей концевых тел на связанные с ним оси системы координат; $M_{x_i}, M_{y_i}, M_{z_i}$ - момент силы упругости троса в проекциях на связанные концевым телом оси.

Уравнения движения дискретных участков троса, имеют вид:

$$\frac{dx_i}{dt} = V_{x_i};$$

$$m_i \frac{dV_{x_i}}{dt} = -\mu m_i \frac{x_i}{r^2} - F_{el_i} \frac{x_i - x_{i-1}}{L_{i-1}} + F_{el_{i+1}} \frac{x_{i+1} - x_i}{L_i};$$

$$\frac{dy_i}{dt} = V_{y_i};$$

$$m_i \frac{dV_{y_i}}{dt} = -\mu m_i \frac{y_i}{r^2} - F_{el_i} \frac{y_i - y_{i-1}}{L_{i-1}} + F_{el_{i+1}} \frac{y_{i+1} - y_i}{L_i};$$

$$\frac{dz_i}{dt} = V_{z_i};$$

$$m_i \frac{dV_{z_i}}{dt} = -\mu m_i \frac{z_i}{r^2} - F_{el_i} \frac{z_i - z_{i-1}}{L_{i-1}} + F_{el_{i+1}} \frac{z_{i+1} - z_i}{L_i};$$

$$r = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}; \qquad (2)$$

$$L_i = \sqrt{\left(x_{i+1} - x_i\right)^2 + \left(y_{i+1} - y_i\right)^2 + \left(z_{i+1} - z_i\right)^2};$$

Здесь ($i = 0..n$ - номер участка троса, где n - число участков троса, в данной модели участки троса заменяются сосредоточенными массами); x_i, y_i, z_i - координаты центра масс рассчитываемой промежуточной точки; $V_{x_i}, V_{y_i}, V_{z_i}$ - проекции скорости точки; m_i - масса точки; $\mu = 398576057600000$ - гравитационный параметр Земли; F_{el_i} - сила упругости, которая имеет вид:

$$F_{el_i} = c\frac{\left(L_{i-1} - l_{i-1}\right)}{l_{i-1}}. \tag{3}$$

Здесь L_i - растянутая длина участка троса; l_i - нерастянутая длина участка троса; c - жёсткость троса (может быть переменной, в случае неоднородной структуры троса).

3. Параллельный подход к моделированию развёртывания КТС

При моделировании процесса развёртывания, используется параллельный подход. Идея, которого заключается в следующем, сначала, когда длина троса мала, численное решение всех дифференциальных уравнений осуществляется в одном потоке. Далее, когда длина троса превысит определённую величину, запускается второй поток, который будет рассчитывать вновь сгенерированные участки троса, далее по мере развёртывания троса, будут запускаться новые потоки для расчёта новых участков троса.

Алгоритм действий, описывается следующим образом:

Задаем конечную длину развернувшегося троса L_n.

Задаем максимальное число участков, на которые разбивается уже полностью развернувшийся трос n.

Определяем максимальное число потоков, которые могут работать параллельное на данном компьютере m.

Определяем число участков, которые будут обрабатываться одним потоком $k = \frac{n}{m}$.

Пусть i - текущее число участков; j - текущее число работающих потоков, тогда условие запуска нового потока

$$if\,(i > k)$$

$$j = j + 1$$

Каждый вновь запущенный поток, будет последовательно заполняться новыми уравнениями для новых участков троса. Ранее запущенный поток, будет обрабатывать свои участки, то есть при запуске нового потока перераспределения участков между потоками не происходит. Данный подход хорошо работает при большом числе участков троса и большом числе потоков, он не требует перераспределения памяти, как если бы нам пришлось перераспределять работу при каждом новом запуске потока.

4. Вывод

Рассмотренный подход для параллельного моделирования, показывает, что он хорошо работает для большого числа участков троса более 50. Для заметного увеличения производительности число параллельно работающих потоков должно быть гарантированно больше 4. Рассмотренный подход можно использовать как для систем с общей памятью (например, использовать OpenMP [4] и обычный персональный компьютер), так и для систем с разделенной памятью (основанной на архитектуре MPI [5]) и реализующейся в современных суперкомпьютерных разработках.

5. Литература

[1] Белецкий, В.В. Динамика космических тросовых систем // В.В. Белецкий, Е.М. Левин. – М.: Наука, 1990. – 336 с.

[2] Заболотнов, Ю.М. Анализ пространственного вращательного движения концевого тела при развертывании орбитальной тросовой систем // Ю.М Заболотнов, О.Н. Наумов // Известия СНЦ РАН. – 2009. – Т.11, №3. – С. 249-256.
[3] Фефелов, Д.И. Моделирование и анализ развертывания и снижения с околоземной орбиты тросовой системы со спускаемой капсулой // Д.И. Фефелов. – Диссертация кандидата технических наук: 05.07.09. – Самара, 2007. – 131 с.
[4] Стандарт распараллеливания программ OpenMP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.openmp.org/ (19.11.2017).
[5] Стандарт распараллеливания программ MPI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.open-mpi.org/doc/ (19.11.2017).

Modelling the process of deployment of the space tether system using parallel algorithms

O.N. Naumov[1]

[1]Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. It is considered the process of modeling the deployment of a space tether system consisting of a basic spacecraft and a descending capsule. There are in modeling are solid bodies of finite dimensions. The end bodies are connected by a heavy tether. The tether is modeled as a set of rigid rods. A distinctive feature of this work is that the algorithm of parallel calculation of the deployment of a distributed space tether system is presented here. Dynamic and kinematic Euler equations are used to describe the equations of motion relative to the center of mass of the end bodies. The Second Law of Newton is used to describe the equations of the tether deployment process.

Keywords: Space tether systems, Parallel Programming, Euler equations, Spacecraft.