УДК 629.7

Шулепов А. И., Лу Цзя

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ В СПУСКАЕМОМ АППАРАТЕ

В настоящее время освоение космического пространства характеризуется новыми проектами и планами. К пилотируемой космонавтике вместе с работой на околоземной орбите вновь собираются вернуться полёты на Луну и к другим планетам Солнечной системы (в первую очёредь к Марсу). Планируется развитие космического туризма. Уже сейчас на околоземной орбите функционируют международная космическая станция (МКС) и станция Китайской народной республики «Тяньгунь-1». Всё это повлечёт большие грузопотоки в космосе.

На орбитальные космические станции в процессе их эксплуатации необходимо доставлять грузы для их функционирования. Это топливо для работы двигательной установки, сменное и необходимое дополнительное оборудование, продукты питания для космонавтов и т.д.

Так, в январе 2013 года российский грузовик доставил три с половиной тонны грузов на международную космическую станцию (МКС). В апреле 2014 года на МКС доставил полезный груз космический грузовой аппарат США Dragon. 18 мая 2014 года Dragon отстыковался и доставил на Землю 1587 килограммов груза с целью обработки и получения научных данных. 29 октября 2014 года на станцию МКС транспортным грузовым кораблём (ТГК) «Прогресс» М-25М» было доставлено 2,5 тонны грузов. Среди этих грузов, помимо компонентов топлива, продукты питания для космонавтов, оборудование для проведения исследовательских работ, проводимых космонавтами в космосе и другое.

Периодически на станции накапливается не используемое оборудование и различные материалы, включая и материалы с результатами проведенных экспериментов.

Первые можно, упаковав произвольным образом в капсуле, «столкнуть» с орбиты, и они сгорят в плотных слоях атмосферы. Вторые, ненужные на станции и являющиеся отработанными, необходимы для определённых целей на Земле, и их необходимо доставить по адресу. Возникает задача их возвращения [1].

Для решения транспортной задачи орбитальных комплексов разрабатывался ряд космических программ. Это программы «Спейс Шатлл» в США, «Энергия – Буран» в СССР и другие.

В настоящее время используется спускаемый аппарат, например, входящий в состав российской транспортной системы ТГК «Прогресс» М-25М». Загрузив его таким образом, чтобы соблюдалось требование к массово-центровочным характеристикам спускаемого космического аппарата, грузы достигают адресата.

Несмотря на кажущуюся простоту постановки задачи, математические трудности, возникающие при её решении, могут быть весьма значительны.

В рассматриваемом случае для реализации решения такой задачи выбрана модель отсеков КА и грузов. Для предварительной оценки размещения грузов в качестве математической модели описания отсеков и грузов выбраны поверхности не выше второго порядка, описанные уравнением:

$$(\mathbf{A}\cdot \mathbf{r}) \cdot \mathbf{r} + 2\cdot \mathbf{a}\cdot \mathbf{r} + b = 0,$$

где $\boldsymbol{A}$ – аффинор с координатами $\boldsymbol{A} = a_{ik}$;

$\boldsymbol{a}$ – вектор с координатами $\boldsymbol{a_i} = a_{ij}$;

$\boldsymbol{a}$ – вектор с координатами $\boldsymbol{a_i} = a_{ij}$;

$i,k = 1,2,3,4;\ j=4.$

Значения коэффициентов уравнения поверхности второго порядка в ориентированной осям декартовой системе координат приведены в таблице 1

Таблица 1 – Значения коэффициентов поверхностей второго порядка

Поверхность	a_{11}	a_{22}	a_{33}	a_{14}	a_{24}	a_{34}	a_{44}
Плоскость	0	0	0	L	m	n	$-(lx_0+ny_0+nz_0)$
Сфера	1	1	1	$-x_0$	$-y_0$	$-z_0$	$x_0^2+y_0^2+z_0^2-R^2$
Цилиндр	0	1	1	0	$-y_0$	$-z_0$	$Y_0^2+z_0^2-R^2$
Конус	$tg^2\,\varphi$	1	1	$-x_0 tg^2\,\varphi$	$-y_0$	$-z_0$	$y_0^2+z_0^2 - x_0^2\ tg^2\,\varphi$

Здесь l, m, n – направляющие косинусы нормали к плоскости; x_0, y_0, z_0 - координаты точки на плоскости, центра сферы, цилиндра, конуса; R – радиус отсека.

Выпуклые многогранники, построенные на плоскостях, позволяют описать зоны размещения грузов на базовом КА и геометрию грузов.

Таким образом, обоснованно выбрана математическая модель описания грузов, зон их размещения и общего вида отсеков КА [3].

При разработке алгоритма и соответствующего прикладного программного обеспечения оценки непересечения размещаемого груза внутри отсека КА (можно разместить или нет) представим зоны размещения и объекты в виде описанных многогранников. Для предварительной оценки, что вполне допустимо для решения задачи, - в виде прямоугольных параллелепипедов. Это значительно упрощает разработку алгоритма, а при увеличении числа граней позволяет повысить адекватность модели реальному отсеку и размещаемым грузам.

Условие взаимного непересечения выпуклых многогранников требует, чтобы их грани попарно не пересекались и ни один многогранник не лежал целиком внутри другого

[2]. Это условие можно записать в виде следующего логического выражения

$$(\bigwedge_{h=1}^{H}\bigwedge_{g=1}^{G} T_{hg}) \wedge T_{01} \wedge T_{02} = 1, \qquad (1)$$

где H, G – число граней многогранников 1 и 2; T_{hg} T_{01} T_{02} - предикаты.

Выпуклые грани не пересекаются, если ни одно ребро *q* грани *g* не пересекается с гранью *h* и ни одно ребро *r* грани *h* не пересекается с гранью *g* (рис. 1):

$$T_{hg} = (\bigwedge_{q=1}^{Q} T_{hq}) \wedge (\bigwedge_{r=1}^{R} T_{gr}) = 1. \qquad (2)$$

Здесь *Q,R* – число ребер в гранях *h,g* соответственно. Ребро *q* пересекается с гранью *h,* если вершины ребра V_s, V_t лежат по разные стороны от плоскости грани *h* и точка пересечения U_q находится внутри многоугольника, образованного ребрами *r* грани *h* (рис. 2).

$$\neg T_{hq} = T_{\varphi h} \wedge (\bigwedge_{r=1}^{R} T_r) = 1. \qquad (3)$$

Предикаты $T_{\varphi h}, T_r$ определяются неравенствами:

$$\neg T_{hq} = T_{\varphi h} \wedge (\bigwedge_{r=1}^{R} T_r) = 1. \qquad (4)$$

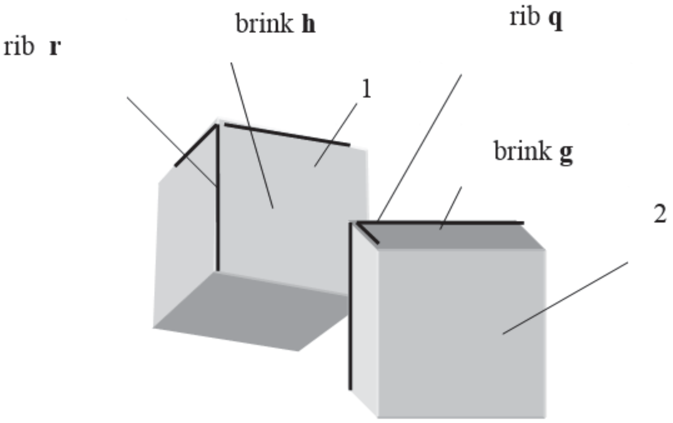

Рисунок 1 – Объекты, представленные в виде выпуклых многогранников. H и G –грани многогранника, q и r ребра (грань- brink, ребро- rib)

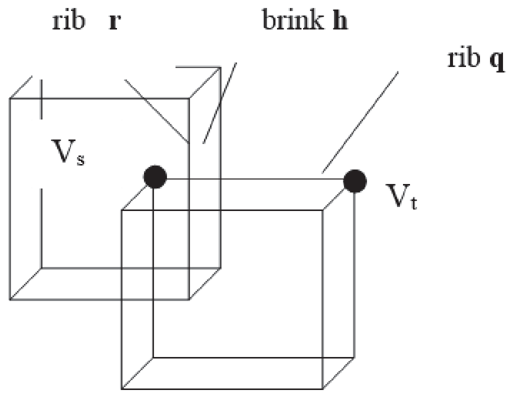

Рисунок 2 – Оценка взаимного положения тел

Предикаты $T_{\varphi h}, T_r$ определяются неравенствами:

$$T_{\varphi h} = \begin{cases} 1, если\, \varphi_h(V_s) \bullet \varphi_h(V_t) > 0; \\ 0, если\, \varphi_h(V_s) \bullet \varphi_h(V_t) \le 0; \end{cases} \qquad (5)$$

$$T_r = \begin{cases} 1, если\, \phi_r(U_q) > 0; \\ 0, если\, \phi_r(U_q) \le 0; \end{cases} \qquad (6)$$

где $\varphi_h(V)=0$ - уравнение плоскости грани; $\phi_r(U)=0$ - уравнение плоскости, проходящей через ребро r перпендикулярно плоскости грани h.

Если условие непересечения поверхностей многогранника выполнено, то для проверки попадания одного многогранника внутрь другого необходимо убедиться, что одна из вершин лежит внутри многогранника

$$\neg T_{01} = \bigwedge_{h=1}^{H} T_h = 1; \tag{7}$$

$$T_h = \begin{cases} 1, если \varphi_h(V_{21}) > 0; \\ 0, если \varphi_h(V_{21}) \le 0, \end{cases} \tag{8}$$

где V_{21} - любая вершина многогранника 2. Предикат T_{02} определяется аналогично.

Объединяя выражения (4)-(8), получим условие непересечения многогранников:

$$\bigwedge_{h=1}^{H}\bigwedge_{g=1}^{G}((\bigwedge_{q=1}^{Q}\neg(T_{\varphi h}\wedge(\bigwedge_{r=1}^{R}T_r)))\wedge(\bigwedge_{r=1}^{R}\neg(T_{\varphi g}\wedge\ldots(\bigwedge_{q=1}^{Q}T_q))))\wedge\neg(\bigwedge_{h=1}^{H}T_h)\wedge\neg(\bigwedge_{g=1}^{G}T_g)=1`.$$

Алгоритм отыскания зон, в которых выполняются требования, предъявляемые к размещению грузов, и обеспечивается условие непересечения малогабаритного космического аппарата, устанавливаемого при попутном эксперименте, реализован на функциональном прикладном языке программирования Delphi.

Библиографический список

1 Конструирование автоматических космических аппаратов. Д.И. Козлов и др. – М., Машиностроение, 1996. – 447 с.

2 Гаврилов В.Н. Автоматизированная компоновка приборных отсеков летательных аппаратов. -М., Машиностроение, 1988. – 136 с.

3 Шулепов А.И. Получение плотных компоновок при попутном запуске [текст] : Всероссийская молодежная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства"/ Даниленко, П.А. под общей редакцией Филатова В.А. - М.: Изд-во ООО "БМВ и К", 2013. - 174 с.