

АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ОСВЕЩЕННЫХ УЧАСТКОВ ПОЛИГОНАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОМ СВЕТОВОМ ПОТОКЕ

Сазонов В. В., Комаров М. М.

Рассматривается задача отыскания освещенных участков поверхностей объектов с учетом их взаимного затенения. Предложен алгоритм, использующий количественную характеристику невидимости [3]. В его основе лежит анализ взаимного расположения контурных циклов, ограничивающих связные области, включающие потенциально освещенные грани. Обработка алгоритмом вырожденных случаев, возникающих при проектировании контуров, рассматривается подробно. Программная реализация алгоритма используется для вычисления главного вектора и главного момента сил светового давления, действующих на космический аппарат произвольной формы [2].

Постановка задачи. Рассматриваются объекты, ограниченные многогранными поверхностями с треугольными гранями. Поверхности объектов считаются замкнутыми и двухсторонними без самопересечений. Каждой грани поверхности объекта соответствуют два вектора нормали: *внешний* и *внутренний*. Выбирая внешний вектор нормали, мы задаем ориентацию поверхности и её ребер (ребро грани ориентировано так, что при движении вдоль ребра рассматриваемая грань располагается слева, если наблюдать из конца вектора нормали).

Сценой будем называть совокупность непересекающихся объектов. Задача состоит в построении освещенных участков поверхностей объектов с учетом их возможного затенения при освещении сцены бесконечно удаленным точечным источником света.

Используемые определения и допущения. Будем называть

грань лицевой, если её нормаль образует острый угол с направлением на источник света, и *нелицевой* в противном случае.

Ребро будем называть *лицевым*, если оно принадлежит двум лицевым граням, *нелицевым*, если оно принадлежит двум нелицевым граням, и *граничным*, если оно является общим ребром лицевой и нелицевой граней. Считаем, что каждое ребро принадлежит ровно двум граням.

Говоря в дальнейшем о проектировании, будем подразумевать ортогональное проектирование на плоскость, ортогональную направлению светового потока.

Грани называются *смежными*, если они имеют общее ребро. Будем считать, что две лицевые грани *связаны*, если можно переместиться с одной грани на другую, двигаясь только по лицевым граням поверхности.

Под *лицевой поверхностью* будем понимать множество лицевых граней, каждая из которых связана со всеми другими гранями этого множества.

Будем называть вершину поверхности *точкой сборки*, если при обходе всех инцидентных данной вершине ребер от ребра к ребру вдоль поверхности по часовой стрелке сумма всех плоских углов больше 2π .

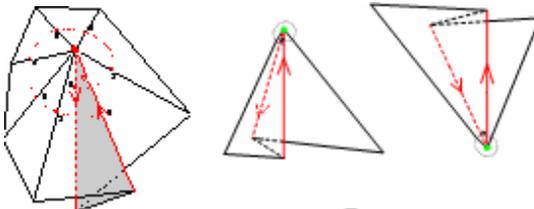


Рис. 1. Сборки триангулированной поверхности

Вершина называется *особой*, если ей инцидентно более двух граничных ребер или она является точкой сборки поверхности.

Индекс затенения точки называется количество лицевых граней, которые закрывают данную точку от источника света. Ясно, что точка поверхности освещена тогда и только тогда, когда её индекс затенения равен нулю. Нелицевые грани не освещены, по-

этому из рассмотрения их следует исключить. Индекс затенения является аналогией индекса количественной невидимости, используемого в алгоритме Аппеля удаления невидимых линий [3].

Способ решения задачи. Индекс затенения является кусочно-постоянной функцией, заданной на лицевых поверхностях объектов. Рассмотрим точку P проекции граничного ребра одной лицевой поверхности на другую. Очевидно, что в ε -окрестности точки P индекс затенения принимает различные значения, и эта точка является точкой разрыва 1-го рода функции индекса затенения.

Рассматриваемый алгоритм состоит в разбиении поверхности объекта на области, в каждой из которых индекс затенения постоянен, и в выделении тех областей, в которых он равен нулю. Для разбиения поверхности на области постоянства индекса затенения необходимо: найти граничные ребра всех поверхностей сцены, построить ортогональные проекции всех граничных ребер на лицевые поверхности объектов сцены, разбить лицевые поверхности на области постоянства индекса затенения и определить индексы затенения внутренних точек областей постоянства.

Контурные циклы. Рассмотрим многогранную поверхность объекта, входящего в состав сцены. Она содержит одну или несколько лицевых поверхностей. Граница лицевой поверхности состоит из граничных ребер, образующих цикл, который будем называть *контурными циклами*. Ориентация каждого контурного цикла определяется ориентацией поверхности. Количество контурных циклов, ограничивающих лицевую поверхность, зависит от формы поверхности рассматриваемого объекта и его положения в пространстве.

На рис. 2 приведены варианты взаимного расположения двух односвязных лицевых поверхностей.

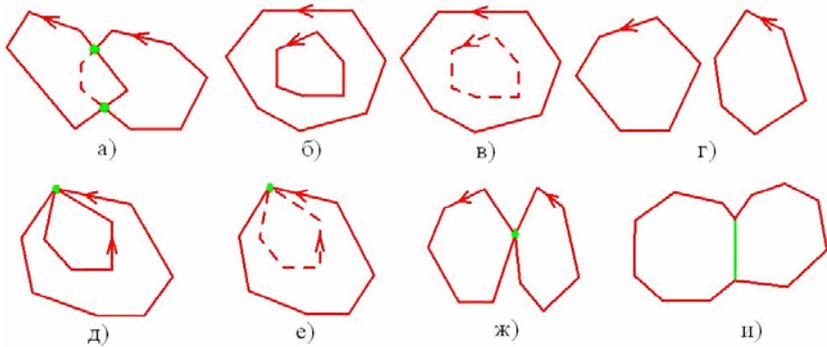


Рис. 2. Варианты взаимного расположения лицевых поверхностей

Каждому варианту взаимного расположения лицевых поверхностей соответствует вариант взаимного расположения их границ. Анализируя характер взаимного расположения контурных циклов в пространстве и их проекций на плоскости, можно определить взаиморасположение лицевых поверхностей, которые рассматриваемые контурные циклы ограничивают.

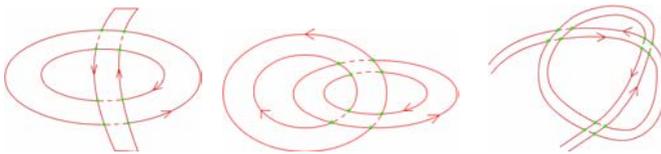


Рис.3. Возможные расположения лицевых поверхностей, которые нельзя упорядочить по глубине

На рис. 3 изображены более сложные случаи взаимного расположения объектов сцены: объекты могут затенять друг друга и располагаться так, что их нельзя упорядочить по расстоянию от источника или объект может частично затенять сам себя.

Следует отметить, что при движении по лицевой поверхности объекта индекс затенения изменяется при прохождении через проекцию любого граничного ребра поверхностей объектов сцены на рассматриваемую лицевую поверхность. Но смена освещенной области на неосвещенную (и наоборот) происходит только при прохождении через проекцию освещенного участка граничного

ребра на рассматриваемую лицевую поверхность.

Процесс решения задачи можно разбить на четыре этапа:

1. отыскание лицевых поверхностей и ограничивающих их контурных циклов, проводится анализ контурных циклов и выявление особых вершин; поверхности всех объектов сцены могут обрабатываться независимо;
2. нахождение пересечений проекций граничных ребер и определение изменения индекса затенения; на этом этапе обрабатываются все граничные ребра всех поверхностей рассматриваемой сцены;
3. нахождение освещенных частей граничных ребер, составляющих контурные циклы, и их проекций на грани лицевых поверхностей объектов;
4. нахождение освещенных областей лицевых поверхностей объектов сцены; Результатом работы алгоритма является набор плоских граней, ограниченных одной или несколькими ломаными, которые составляют освещенные участки поверхностей объектов сцены (Рис. 4). Грани могут быть: треугольниками (1), многоугольниками, ограниченными одной ломаной без самопересечений (2), неодносвязными плоскими областями, ограниченными несколькими ломаными (3).

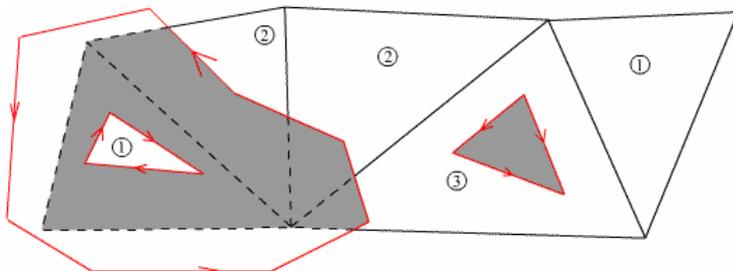


Рис. 4. Результат работы алгоритма. Затененные участки закрашены серым цветом

Вычисление моментов сил светового давления. Основным приложением рассматриваемого алгоритма является вычисление сил и моментов светового давления, действующих на кос-

мический аппарат произвольной формы в плоскопараллельном световом потоке.

Космический аппарат моделируется совокупностью пересекающихся многогранных поверхностей с треугольными гранями. Обозначим через \vec{s} направление на источник света. Фотометрические свойства поверхности описываются двумя коэффициентами: ε , $\varepsilon \geq 0$ и ρ , $0 \leq \rho$, $\varepsilon + \rho \leq 1$. Считается, что доля ε общего числа фотонов, падающих на грань, отражается зеркально, доля ρ отражается диффузно и доля $1 - \varepsilon - \rho$, полностью поглощается.

Для грани с номером i обозначим: p — световое давление, σ_i — площадь грани, \vec{n}_i — внешняя нормаль, \vec{r}_i — радиус-вектор центра масс грани, относительно полюса приведения O , ε_i и ρ_i — коэффициенты отражения и поглощения.

Сила \vec{F} и момент \vec{M} светового давления, действующие на многогранную поверхность, определяется следующим формулами [2]:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= -2p \sum_i \varepsilon_i (\vec{s}_i \cdot \vec{n}_i)^2 \sigma_i \vec{n}_i - \frac{2}{3} p \sum_i \rho_i (\vec{s}_i \cdot \vec{n}_i) \sigma_i \vec{n}_i - \\ &- p \vec{s} \sum_i (1 - \varepsilon_i) (\vec{s} \cdot \vec{n}_i) \sigma_i \\ \vec{M} &= 2p \sum_i \varepsilon_i \sigma_i (\vec{s} \cdot \vec{n}_i)^2 (\vec{n}_i \times \vec{r}_i) + \frac{2}{3} p \sum_i \rho_i \sigma_i (\vec{s}_i \cdot \vec{n}_i) (\vec{n}_i \times \vec{r}_i) + \\ &+ p \vec{s} \times \sum_i (1 - \varepsilon_i) (\vec{s} \cdot \vec{n}_i) \vec{r}_i. \end{aligned}$$

Здесь суммирование ведется по всем освещенным граням.

Полученные результаты. Программная реализация алгоритма использовалась для расчетов сил и моментов светового давления, действующих на космический аппарат Фотон-11 Мо-

дель аппарата, содержащая 2304 грани, была создана с помощью программы 3D моделирования 3D Max.

На рис. 5 представлены результаты расчетов сил и моментов светового давления в случае полного поглощения и полного зеркального отражения. Ось OX направлена вдоль аппарата и проходит через его центр масс. Рассматривалось вращение вокруг оси OY . На интервале $[-\pi, \pi]$ взято 2000 точек.

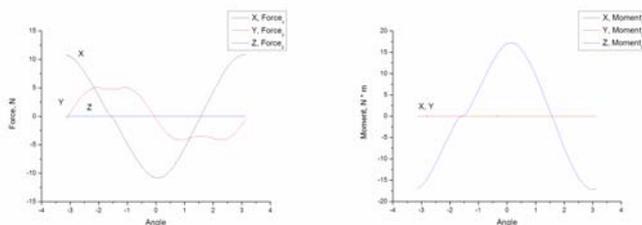


Рис. 5. Графики значений компонентов векторов силы и момента сил светового давления

Закключение. Рассматриваемый в этой работе алгоритм использует некоторые идеи алгоритма, предложенного в [1]. В отличие от алгоритма из [1] предлагаемый алгоритм находит только те участки поверхности и их границы, где индекс затенения равен нулю, опуская нахождение индекса затенения на всех поверхностях сцены, что позволяет заметно увеличить производительность. Особое внимание уделено обработке особых и вырожденных случаев, которые возникают при проектировании контуров. Подробное рассмотрение особых случаев позволило создать устойчивую программную реализацию алгоритма, которая используется в комплексе программ для вычисления главного вектора и главного момента светового давления, действующих на космический аппарат произвольной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабан И.Ю., Комаров М.М., Сазонов В.В., Определение освещенных участков поверхности космических объектов при

- расчете сил и моментов светового давления, препринт Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, 1995 год, №57.
2. Комаров М.М., Сазонов В.В., Расчет сил и моментов светового давления, действующих на астероид произвольной формы. Препринт Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, 1993 год, №39.
 3. Appel A., The Notion of Quantitative Invisibility and Machine Rendering of Solids, Proc. of ACM National Conference, Thompson Book, 1967, pp. 387.

FINDING LIGHTED SURFACE PARTS OF POLYGONAL SURFACE IN PARALLEL LIGHT FLUX

Sazonov V. V., Komarov M. M.

In this paper a problem of finding lighting surface parts with mutual shading effects is considered. A new algorithm is presented, which is development of algorithm from [1] and uses the quantitative invisibility characteristic [3]. Proposed algorithm is based on positional relationship analysis of contour cycles. Contour cycles confine connected areas, which contain potentially lighted faces. Processing of all singularities is considered in details. Also several stability and optimization issues of program implementation are discussed.

Implementation of this algorithm is used in program pack for calculations of main vector and main moment of light pressure force, which affects on spacecraft with arbitrary shape. Considered algorithm provides with effectiveness and accuracy increase.