

**МОДЕЛЬ ОТРАЖЕНИЯ
СВЕТА ПОВЕРХНОСТЬЮ
ДЛЯ ЗАДАЧИ РЕКОНСТРУКЦИИ
ФОРМЫ ОБЪЕКТА ПО
ПОЛУТОНАМ**

Введение. Способность воспринимать объемные объекты связана с бинокулярным зрением. Значительный рост производительности процессоров привел к появлению технических средств, которые позволяют конвертировать обычное 2D изображение и видео в трехмерную картинку в режиме реального времени. Алгоритмы, которые при этом используются, обрабатывают информацию в несколько этапов: сегментация изображения, анализ геометрических данных, определение дальности по косвенным параметрам (размытие, четкость и т. д.), создание карты глубины и построение стереопары. При этом в видеопотоке можно выделить изображения, смещенные в определенном направлении (shape from motion), что улучшает результат конвертирования [1].

Постановка задачи. В некоторых случаях необходимо провести реконструкцию трехмерной формы объекта по одному изображению, когда исходные данные не несут дополнительной информации о глубине (например, фрактографические изображения, фотографии поверхности Марса и других планет). Для экспресс-оценки 3D поверхности используют метод реконструкции по полутоновым изображениям (shape from shading) [2, 3]. В 1970 г. Бертольд Хорн использовал радиометрический метод отражения света при формировании изображения, что позволило проводить конвертацию одного

Рассмотрена модель функции отражающей способности света поверхностью для задачи восстановления формы по полутоновым изображениям. Учтены физические и геометрические свойства поверхности для улучшения работы алгоритма. Предложены некоторые ограничения для упрощения модели.

© О.Я. Ковальчук, Б.П. Русын,
П.И. Чопык, 2012

2D изображения в 3D по-
верхность. В его исследова-
ниях использовалась упро-
щенная

модель отражения света поверхностью. В других работах были усовершенствованы, в основном, алгоритмы реализации метода [4]. Нерешенной остается задача построения более совершенной модели отражения света поверхностью, с помощью которой можно получить более точные результаты при достаточно высокой скорости работы для анализа фрактографических изображений.

Оптические свойства поверхности зависят от нескольких факторов: расположения и ориентации объекта в пространстве, отражательных свойств поверхности, расположения источника света и камеры. Создано несколько моделей отражения света поверхностью, которые можно разделить на две группы: физические и геометрические [5]. Физические модели используют электромагнитную теорию света и являются более общими, но в большинстве они построены для 3D моделирования и непригодны для алгоритмов реконструкции. Геометрические модели более простые, но не достаточно точные.

Функция отражательной способности. Освещенность в точке пространства зависит от трех компонент: диффузной, зеркальной и фоновой (рис. 1). Фоновую компоненту для данного метода можно не учитывать, так как при реконструкции определяется относительное расположение элементов поверхности, а не абсолютное их положение в пространстве. Отражение от гладкой поверхности, например, зеркала или неподвижной поверхности воды, происходит зеркально, отражение от шероховатых поверхностей, например, бумаги, ткани, асфальта, происходит диффузно. Большинство поверхностей не являются идеально диффузными или зеркальными.

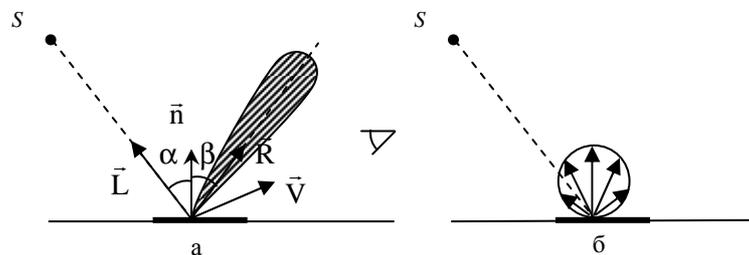


РИС. 1. Отражение света поверхностью: а – зеркальное; б – диффузное

На рис. 1 использованы следующие обозначения:

\vec{L} – единичный вектор, направленный на источник света;

\vec{R} – вектор, направленный вдоль отраженного луча;

\vec{n} – нормаль к поверхности;

\vec{V} – единичный вектор в направлении на приемник;

S – источник света.

Для алгоритмов машинного зрения чаще всего используют диффузную модель Ламберта. Зеркальное отражение проявляется в виде бликов на изображении, при этом отраженный луч сохраняет свойства падающего. На практике

процесс отражения можно рассматривать как комбинацию диффузной и зеркальной компонент. При построении таких изображений используют эмпирическую модель Фонга, но она не учитывает физических свойств поверхности материалов.

Модели отражения, как правило, отличаются в представлении двунаправленной функции отражающей способности (*BRDF*). Функция

$$R = BRDF(\lambda, \vec{L}, \vec{V}, \vec{n}) \text{ или } R = BRDF(\lambda, \delta, \beta_s, \varphi, \beta_T), \quad (1)$$

где λ – длина волны падающего света; (φ, β_s) – направление на источник; (δ, β_T) – направление на приемник (β_s, β_T – азимутальные углы), \vec{L}, \vec{V} – те же, что и на рис. 1, выражает зависимость энергии света, которая излучается в направлении наблюдения от энергии света, поступающего от источника при отражении (рис. 2). $\vec{h} = \frac{\vec{L} + \vec{V}}{|\vec{L} + \vec{V}|}$ – единичный вектор вдоль биссектрисы угла между

векторами \vec{L}, \vec{V} , α – угол между \vec{n} и \vec{h} , θ – угол между \vec{L} и \vec{h} или угол между \vec{V} и \vec{h} .

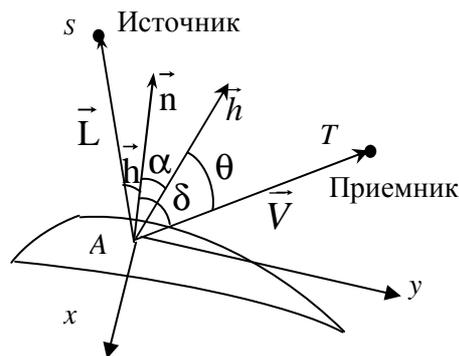


РИС. 2. Геометрия функции отражательной способности

Для определения отражающих свойств поверхности материалом функцию отражающей способности можно определить экспериментально с помощью гониорефлектометра. Такие приборы используют прецизионные источники света и откалиброванные сенсоры для измерения отражения при всех возможных комбинациях их расположения. Они дают возможность с высокой точностью определить функцию отражательной способности, заданную в табличной форме. Определением BRDF некоторых поверхностей с помощью гониорефлектометра занимаются несколько лабораторий (например, Центр графики и визуализации университета Корноела). Эта информация находится в открытом доступе. Но для метода восстановления формы объекта по полутонам использование функции отражательной способности, заданной в табличной форме, затруднено, поэтому применяют другие модели (Блина, Кука – Торенса, Орена – Найра – обобщенную модель Ламберта и другие).

Модель шероховатой поверхности. Для задания функции отражающей способности аналогично [6, 7] воспользуемся представлением шероховатой поверхности в виде совокупности симметрических микровпадин, грани которых абсолютно ровные (рис. 3). Будем считать, что размеры микровпадин намного меньше, чем размеры области поверхности, которая отвечает одному пикселю изображения, но намного больше длины волны светового излучения. Для упрощения предположим, что все микровпадины одинакового размера.

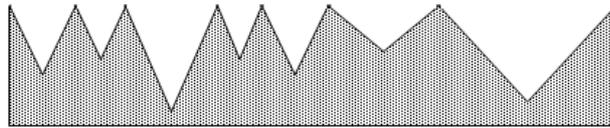


РИС. 3. Моделирование поверхности с помощью микровпадин

Функция отражающей способности задается уравнением

$$R = \frac{I}{E}, \quad (2)$$

где I – интенсивность отраженного света, которую можно определить по изображению; E – энергия падающего света. В большинстве случаев источник света точечный и удален на значительное расстояние от поверхности, поэтому будем считать, что свет падает на поверхность параллельным пучком. Тогда $E = \text{const}$ возле поверхности.

Функцию отражательной способности можно представить в виде суммы зеркальной и диффузной компонент:

$$R = sR_s + dR_d, \text{ где } s + d = 1. \quad (3)$$

Интенсивность отраженного падающего света возле поверхности

$$I = cI_0(sR_s + dR_d),$$

где c – коэффициент пропорциональности (альбедо), I_0 – интенсивность света, падающего на поверхность. Диффузный компонент не зависит от расположения приемника, в то же время зеркальная компонента ярко выражена только в одном направлении.

Чтобы учесть физическую природу отражения света, воспользуемся формулами Френеля для непрозрачной среды [8], которые подходят как для металлов, так и для диэлектриков. Коэффициенты отражения падающей волны по интенсивности для двух поляризаций равны:

$$F_{\perp} = \frac{(a - \cos \varphi)^2 + b^2}{(a + \cos \varphi)^2 + b^2}, \quad F_{\parallel} = F_{\perp} \frac{(a - \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi)^2 + b^2}{(a + \sin \varphi \operatorname{tg} \varphi)^2 + b^2}, \quad (4)$$

где $a^2 = \frac{p + \sqrt{p^2 + 4n^2k^2}}{2}$, $b^2 = \frac{-p + \sqrt{p^2 + 4n^2k^2}}{2}$, $p = n^2 - k^2 - \sin^2 \varphi$, n – коэффициент преломления, k – коэффициент экстинкции для данного материала

поверхности. Будем считать, что свет падает на поверхность нормально ($\varphi = 0$), тогда параметры a и b упрощаются: $a = n$, $b = k$. Для малых углов $\varphi < 12^\circ$ поляризацию падающего излучения можно не различать, тогда

$$F = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \approx \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}. \quad (5)$$

Формула Френеля (5) применима только для отдельных впадин. Вся поверхность описывается с помощью статистического распределения Гаусса:

$$D = \frac{1}{2\pi\sigma^2 \cos^3 \varphi} e^{-\frac{\text{tg}^2 \varphi}{2\sigma^2}}, \quad \sigma = \frac{\langle \sigma \rangle_{кв}}{l_k}, \quad (6)$$

где $\langle \sigma \rangle_{кв}$ – среднеквадратическое отклонение высоты поверхности, l_k – корреляционная длина. Функция распределения вероятности (6) является хорошей аппроксимацией реальных поверхностей. Учитывая (5) и (6), двунаправленную функцию отражающей способности для зеркальной компоненты можем записать в следующем виде:

$$R_s = \frac{F}{\pi} \frac{DG}{(\vec{n} \cdot \vec{L})(\vec{n} \cdot \vec{V})}. \quad (7)$$

В формулу (7) входит функция G – геометрический ослабляющий фактор, которая описывает затенение и маскировку микровпадин, а также множественное отражение света от границ впадин:

$$G = \min \left[1, \max \left[0, \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{V})}{(\vec{V} \cdot \vec{h})}, \frac{2(\vec{n} \cdot \vec{h})(\vec{n} \cdot \vec{L})}{(\vec{V} \cdot \vec{h})} \right] \right]. \quad (8)$$

Заключение. Рассмотренная модель отражения света поверхностью основана на микровпадинах и учитывает как геометрические, так и физические законы. При формировании изображения для метода реконструкции формы поверхности по полутонам учтены свойства материала поверхности объекта и выбрано необходимое положение источника света, что позволило упростить модель и увеличить точность реконструкции без уменьшения скорости обработки изображений.

О.Я. Ковальчук, Б.П. Русин, П.И. Чопик

МОДЕЛЬ ВІДБИВАННЯ СВІТЛА ПОВЕРХНЕЮ ДЛЯ ЗАДАЧІ
РЕКОНСТРУКЦІЇ ФОРМИ ОБ'ЄКТА ЗА НАПІВТОНАМИ

Розглянуто модель функції відбивальної здатності світла для методу відновлення форми поверхні за напівтоновим зображенням. Враховано фізичні та геометричні властивості поверхні для покращення роботи алгоритму. Запропоновано деякі обмеження для спрощення моделі.

O.Ya. Kovalchuk, B.P. Rusyn, P.I. Chopyk

A MODEL OF LIGHT REFLECTION FROM THE SURFACE FOR THE PROBLEM OF RECONSTRUCTING THE FORM OF THE OBJECT BY HALF-TONES

A model of reflectivity function for the method of shape restoration by half-tones is considered. To increase the algorithm performance, physical and geometrical properties of the surface are taken into account. Some restrictions are imposed to simplify the model.

1. *Ashutosh Saxena, Min Sun, Andrew Y. Ng, In. Make3D: Learning 3-D Scene Structure from a Single Still Image // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI). – 2008. – 31, N 5. – P. 824–840.*
2. *Horn B.K.P. Height and gradient from shading // International Journal of Computer Vision. – 1990. – 5, N. 1. – P. 37–75.*
3. *Ping-Sing Tsai and Mubarak Shah. Shape from shading using a linear approximation // Image and Vision Computing. – 1994. – 12. – P. 487–498.*
4. *Ruo Zhang, Ping-Sing Tsai, Cryer J.E., Shah M. Shape from shading: A survey // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. – 1999. – 21, N 8. – P. 690–706.*
5. *Murat Kurt, Dave Edwards. A survey of BRDF models for computer graphics // ACM SIGGRAPH Computer Graphics - Building Bridges - Science, the Arts & Technology. – 2009. – 43, N 2. – P. 17–24.*
6. *Robert L. Cook, Kenneth E. Torrance. A Reflectance Model for Computer Graphics // ACM Transactions on Graphics. – 1982. – 1, N 1. – P. 7–24.*
7. *Oren M., Nayar S.K. Generalization of the lambertian model and implications for machine vision // Technical Report CUCS-057-92. – Department of Computer Science, Columbia University. – New York, USA, 1992. – 42 p.*
8. *Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 876 с.*

Получено 08.12.2011

Об авторах:

Ковальчук Ольга Ярославовна,

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экономической кибернетики и информатики ТНЭУ,
e-mail: olhakov@gmail.com

Русын Богдан Павлович,

доктор технических наук, заведующий отделом методов и систем обработки, анализа и идентификации изображений ФМИ им. Г.В. Карпенко НАН Украины,
e-mail: rusyn@ipm.lviv.ua

Чопык Павел Иванович,

ассистент кафедры физики ТНПУ им. В. Гнатюка.
e-mail: chip.ukraine@gmail.com