

УДК 681.5.20

МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО ЗАДАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПО СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЯМ РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

© С. И. Вяткин, Б. С. Долговесов

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: sivser@mail.ru,
bsd@iae.nsk.su*

Предложен метод реконструкции функционально заданных поверхностей по стереоизображениям реальных объектов. В качестве предобработки использован известный подход к вычислению объёмных моделей по изображениям силуэтов в пространстве объекта. Для вычисления карты глубины применён известный алгоритм на основе площади с корреляцией уровней интенсивности изображения. В целях реконструкции гладкой поверхности с компактным описанием предложен новый метод преобразования в функционально заданную модель.

Ключевые слова: реконструкция трёхмерных объектов, силуэт, стереопара, карта глубины, восьмеричное дерево, функции возмущения.

DOI: 10.15372/AUT20200603

Введение. Вычисление трёхмерных ($3D$) данных и информации о дальности — важная задача в различных приложениях: компьютерной графике, медицине, мультимедиа, машинном зрении, навигации, автомобильной безопасности, компьютерном взаимодействии, отслеживании, распознавании изображений и многих других. Получение трёхмерных геометрических данных из сложной среды является предметом исследований в течение многих лет. Компьютерная графика и анализ изображений представляют собой два метода обработки визуальной информации. Компьютерная графика оперирует формальными описаниями объектов для создания их визуальных образов. Системы анализа изображений работают с изображениями для получения формализованных моделей объектов. В последнее время наметилась тенденция к взаимной интеграции компьютерной графики и анализа изображений. Это связано в первую очередь с развитием систем виртуальной реальности, использующих $3D$ -моделирование реальных объектов, которое неэффективно для сложных объёмных объектов, требующих значительных временных и вычислительных ресурсов.

Известны активные и пассивные методы восстановления информации о глубине реальной сцены. Активные методы, дающие на выходе информацию о глубине, используют лазерное освещение рабочего пространства [1]. Однако у этих методов есть ограничения по отношению к диапазону измерений и стоимости аппаратных компонентов.

Пассивные методы, основанные на компьютерном зрении, реализуются более простыми и недорогими сенсорами, определяющими расстояние. Такие методы способны генерировать информацию о глубине по полученной паре изображений и параметрам двух камер [2].

Моделирование формы объектов реального мира из серии изображений было исследовано в последние годы. Одним из известных подходов к трёхмерному моделированию является создание формы из силуэта, который восстанавливает форму предметов по их контурам. Этот подход пользуется популярностью благодаря быстрым вычислениям и надёжности. Построение трёхмерных моделей по нескольким точкам зрения представлено

в [3]. В методе [4] используется ортогональная проекция для построения объёмных моделей. Многочисленные исследования посвящены созданию форм из силуэтов для преобразования видимых контуров в визуальную форму [5–7].

Целью представленной работы является построение метода реконструкции трёхмерной модели реального объекта с помощью силуэтов и многовидовых карт глубин, которые генерируются с помощью стереопары с последующим преобразованием в функциональную модель.

В данной работе использован известный метод создания формы из силуэтов [8] и алгоритм корреляции [9] для вычисления карты глубины.

Функции возмущения. Предлагается описывать сложные геометрические объекты, задавая функцию возмущения (второго порядка) от базовой квадрики, которая имеет вид неравенства

$$F(x, y, z) = Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Exz + Fyz + Gx + Hy + Iz + K \geq 0. \quad (1)$$

На базе квадрик строятся свободные формы. Свободная форма есть композиция базовой квадрики $F(x, y, z)$ и возмущений [10]

$$F'(x, y, z) = F(x, y, z) + \sum_{i=1}^N f_i R_i(x, y, z), \quad (2)$$

где $R(x, y, z)$ — возмущение, f_i — формфактор:

$$R_i(x, y, z) = \begin{cases} Q_i^3(x, y, z), & \text{если } Q_i(x, y, z) \geq 0; \\ 0, & \text{если } Q_i(x, y, z) < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $Q(x, y, z)$ — возмущающая квадратика.

Получающаяся поверхность будет гладкой, и потребуется небольшое количество функций возмущения для создания сложных форм поверхностей, количество данных сокращается более чем в 100 раз в сравнении с полигональным описанием [11].

Реконструкция объекта. Калибровка стереокамер с вычислением таких параметров, как фокусные расстояния, взаимное расположение камер в пространстве, параметры оптического искривления, которыми обладают все видеокамеры, параметры яркостных искажений и другие, в данной работе рассматриваться не будут.

Метод состоит из трёх этапов вычислений:

1) вычисление силуэтов, воксельной модели, пересечённых узлов восьмеричного дерева от корня до листьев;

2) вычисление многовидовых карт глубин, облаков точек, объединение облаков точек, построение сетки треугольников, вычисление нормалей;

3) преобразование в функциональную модель.

Для решения задачи реконструкции объектов использованы известный метод 3D-реконструкции с применением вокселей [8], стереорекострукция с определением глубины и нормалей поверхности [12, 9] и преобразование в функционально заданное описание структуры восьмеричного дерева и вычисленных нормалей.

1. В методе 3D-реконструкции с применением вокселей поворотный диск вращается, видеоизображения захватываются и извлекается контур реального объекта (рис. 1).

Когда геометрия камеры известна, ограничивающая пирамида может быть построена для каждого изображения. Это выполняется по линиям визирования от фокуса камеры через все контурные точки силуэта объекта. Форма вычисляется в объёме методом вырезания, чтобы убрать все воксели, которые лежат за пределами проецируемого силуэтного



Рис. 1. Реальный объект с тенями в разных ракурсах

конуса. Пересечение всех силуэтных конусов из нескольких изображений определяет геометрию объекта, называемую визуальной формой [8].

Если координата изображения определяет пиксель фона, воксель помечается как подлежащий удалению. После обработки всех вокселей объект поворачивается и алгоритм работает со следующим изображением.

Метод оптимизирован на основе воксельных вычислений с использованием структуры восьмеричного дерева. Воксели на текущем уровне могут быть получены из результатов предыдущего уровня путём применения модифицированного алгоритма. Ограничения на области, содержащие соответствующий объект информации, значительно ускоряют время вычислений. Использование такой предобработки намного уменьшает вероятность ошибки вычисления глубины.

Вычисления нормалей к воксельным поверхностям — нетривиальная задача. Скалярное поле воксельной модели рассматривается в текущем состоянии, т. е. при рассмотрении не принимается во внимание его зависимость от времени. Градиент скалярного поля $\nabla f(x)$ всегда перпендикулярен поверхностям уровня — множеству точек пространства, в которых скалярное поле принимает одно и то же значение. Поэтому нормаль к воксельной поверхности в данной точке $\mathbf{n}(\mathbf{x})$ можно вычислить как градиент скалярного поля, представляющий собой вектор частных производных скалярного поля по направлениям осей системы координат. Частную производную $\partial f(\mathbf{x})/\partial x$ рассматриваемого скалярного поля по направлению i -й оси системы координат можно найти как свёртку дискретной функции $f[\mathbf{k}]$ с ядром фильтра специального вида. Последовательность операций осуществляется за один проход для одного блока воксельной модели. Чтобы получить изображение всей воксельной модели или отдельной её части с камеры, процедуру необходимо повторить для каждого блока в выборке. Скорость работы зависит от количества и размеров выводимых блоков, пиксельной площади проекции, ориентации камеры относительно объёмной решётки (при диагональном ходе проекционных лучей через блоки количество выборок вокселей увеличивается). К недостаткам метода следует отнести нецелостную обработку блоков. В результате нормали рассчитываются для границ блоков, при этом целостность карты нормалей монолитного тела не соблюдается.

Поэтому в работе для вычисления нормалей был применён другой метод.

2. Дополнительно к формированию воксельной формы привлекается метод реконструкции 3D-сцены из последовательности изображений для вычисления карт глубины.

Для калиброванной стереопары имеем две проективные матрицы [12]:

$$\begin{pmatrix} u_i s_i \\ v_i s_i \\ s_i \end{pmatrix} = M_i \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где X, Y, Z — трёхмерные координаты точки; u_i и v_i — их проекции на изображении i ; s_i — масштабный множитель. Стереопара $I = (u, v)$ — точка плоскости изображения; $P = (x, y, z)$ — точка мировой системы координат.

Из калиброванной стереопары вычисляется карта глубины одного ракурса изображения с применением алгоритма корреляции. В данной работе используется алгоритм на основе площади с корреляцией уровней интенсивности изображения (grey levels) [9].

Количество ракурсов генерируется в соответствии с числом силуэтов, вычисленных ранее. Карты глубин проецируются обратно в трёхмерное пространство объекта. При реконструкции 3D-формы из мультивидовых силуэтов и карт глубин сначала генерируется облако 3D-точек из каждого глубинного изображения с соответствующей установкой камер. Объединение этих облаков точек рассматривается как начальная оценка формы. Затем она уточняется с применением ранее вычисленных силуэтов для фильтрации шумовых точек. Точка будет сохранена только в том случае, если все её мультивидовые 2D-проекции находятся внутри силуэтов. Далее строится сетка треугольников и вычисляются нормали, как описано в [13].

3. Конечная форма на основе функций возмущения очень сильно зависит от точности нормалей, поскольку вычисления начинаются с обхода листьев восьмеричного дерева, где они хранятся. После вычисления воксельной модели и нормалей в каждой точке на поверхности отмечаются все пересечённые узлы восьмеричного дерева от корня до листьев для создания функционально заданного объекта (в листьях хранятся вычисленные нормали).

Поверхностные воксели (листья восьмеричного дерева) согласованы с входным сигналом изображения. Функциональные объекты состоят из базовых квадрики и функций возмущения.

Чтобы отличить базовую квадрику от функций возмущения, предварительно определяются коэффициенты её уравнения. Для этого необходимо квадрику вписать в полученную структуру восьмеричного дерева модели и найти коэффициенты базовой квадрики по девяти габаритным точкам поверхностных вокселей. Имеем коэффициенты уравнений функций возмущений (1) $A, B, C, D, E, F, G, H, I, K$ и коэффициенты уравнений базовой квадрики q . При следующем задании квадрики

$$Q = \begin{pmatrix} q_{xx} & q_{xy}/2 & q_{xz}/2 & q_x/2 \\ q_{xy}/2 & q_{yy} & q_{yz}/2 & q_y/2 \\ q_{xz}/2 & q_{yz}/2 & q_{zz} & q_z/2 \\ q_x/2 & q_y/2 & q_z/2 & q \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Значение функции, заданной (5) в произвольной точке $P[x, y, z]$, запишем в виде

$$Q(P[x, y, z]) = q_{xx}x^2 + q_{yy}y^2 + q_{zz}z^2 + q_{xy}xy + q_{xz}xz + q_{yz}yz + q_x x + q_y y + q_z z + q. \quad (6)$$

Так как значение Q на поверхности равно нулю, то для нахождения коэффициентов квадрики по девяти точкам $P_1[x_1, y_1, z_1] \dots P_9[x_9, y_9, z_9]$ имеем систему линейных уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(P_1) = 0 \\ Q(P_2) = 0 \\ \vdots \\ Q(P_i) = 0 \\ \vdots \\ Q(P_9) = 0 \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Подставляя (6), получим

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{xx}x_1^2 + q_{yy}y_1^2 + q_{zz}z_1^2 + q_{xy}x_1y_1 + q_{xz}x_1z_1 + q_{yz}y_1z_1 + q_x x_1 + q_y y_1 + q_z z_1 + q = 0; \\ q_{xx}x_2^2 + q_{yy}y_2^2 + q_{zz}z_2^2 + q_{xy}x_2y_2 + q_{xz}x_2z_2 + q_{yz}y_2z_2 + q_x x_2 + q_y y_2 + q_z z_2 + q = 0; \\ \vdots \\ q_{xx}x_i^2 + q_{yy}y_i^2 + q_{zz}z_i^2 + q_{xy}x_iy_i + q_{xz}x_iz_i + q_{yz}y_iz_i + q_x x_i + q_y y_i + q_z z_i + q = 0; \\ \vdots \\ q_{xx}x_9^2 + q_{yy}y_9^2 + q_{zz}z_9^2 + q_{xy}x_9y_9 + q_{xz}x_9z_9 + q_{yz}y_9z_9 + q_x x_9 + q_y y_9 + q_z z_9 + q = 0. \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Решением системы уравнений со свободным членом q (положим его равным K) при заданных $P_1[x_1, y_1, z_1] \dots P_9[x_9, y_9, z_9]$ будут девять искомым коэффициентов: $q_{xx}, q_{yy}, q_{zz}, q_{xy}, q_{xz}, q_{yz}, q_x, q_y, q_z$.

Далее коэффициенты этой квадратки будут использоваться при преобразовании в функциональную модель и вычисляться с помощью метода Крамера:

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & x_1y_1 & x_1z_1 & y_1z_1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 & x_2y_2 & x_2z_2 & y_2z_2 & x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3^2 & y_3^2 & z_3^2 & x_3y_3 & x_3z_3 & y_3z_3 & x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4^2 & y_4^2 & z_4^2 & x_4y_4 & x_4z_4 & y_4z_4 & x_4 & y_4 & z_4 \\ x_5^2 & y_5^2 & z_5^2 & x_5y_5 & x_5z_5 & y_5z_5 & x_5 & y_5 & z_5 \\ x_6^2 & y_6^2 & z_6^2 & x_6y_6 & x_6z_6 & y_6z_6 & x_6 & y_6 & z_6 \\ x_7^2 & y_7^2 & z_7^2 & x_7y_7 & x_7z_7 & y_7z_7 & x_7 & y_7 & z_7 \\ x_8^2 & y_8^2 & z_8^2 & x_8y_8 & x_8z_8 & y_8z_8 & x_8 & y_8 & z_8 \\ x_9^2 & y_9^2 & z_9^2 & x_9y_9 & x_9z_9 & y_9z_9 & x_9 & y_9 & z_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{xx} \\ q_{yy} \\ q_{zz} \\ q_{xy} \\ q_{xz} \\ q_{yz} \\ q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K \\ K \\ K \\ K \\ K \\ K \\ K \\ K \\ K \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Функционально модель при растеризации задаётся в кубе с центром $(0, 0, 0)$ и координатами от -1 до 1 по x, y, z в системе координат объекта. При восьмеричном делении коэффициенты уравнения A, B, C, D, E, F делятся на 4 , коэффициенты XYZ — на 2 (уменьшаем размеры куба). После этого делается сдвиг на вектор $(\pm 0,5; \pm 0,5; \pm 0,5)$ (10), где коэффициенты без штриха берутся с предыдущего шага рекурсии:

$$\begin{aligned} A' &= A/4, & B' &= B/4, & C' &= C/4, & D' &= D/4, & E' &= E/4, & F' &= F/4, \\ G' &= G/2 + iA/2 + jD/4 + kE/4, & H' &= H/2 + iD/4 + jB/2 + kF/4, \\ I' &= I/2 + iE/4 + jF/4 + kC/2, & K' &= K/2 + iG/4 + jH/4 + kI/4, \end{aligned} \quad (10)$$



Рис. 2. Виртуальный функционально заданный объект в разных ракурсах

$$K'' = K'/2 + iG'/2 + jH'/2 + kI'/2.$$

Известны все точки поверхности (поверхностные воксели), отмечены все ветви и листья дерева, где имело место пересечение модели с кубами разных уровней восьмеричного дерева деления пространства объекта, а также все пересечённые листья дерева. Главная идея заключается в следующем. Если с помощью рекурсивного деления объектного пространства можно визуализировать функционально заданные объекты (вычислять точки поверхности, нормали в этих точках, освещённость и т. д.), то можно решить и обратную задачу:

$$N_x = \frac{G'}{\sqrt{G'^2 + H'^2 + I'^2}}; \quad (11)$$

$$N_y = \frac{H'}{\sqrt{G'^2 + H'^2 + I'^2}}; \quad (12)$$

$$N_z = \frac{I'}{\sqrt{G'^2 + H'^2 + I'^2}}, \quad (13)$$

т. е. по заданным точкам и нормалям (11), (12), (13) найти функции, описывающие данный объект.

Решаются системы линейных уравнений на каждом уровне рекурсии, определяются одинаковые коэффициенты уравнений (с учётом установленного порога точности приближения) и минимизируется количество функций на каждом уровне. Только после обработки всех уравнений данного уровня происходит переход на следующий верхний уровень. Этот процесс повторяется до самого корня восьмеричного дерева, получая в результате необходимый минимум функций, представляющих данный объект в формате описания функционально заданных объектов на базе квадрик с аналитическими функциями возмущения (рис. 2).

Таблица 1

Уменьшение времени вычислений с использованием иерархической обработки

CPU E8400	Уровни	CPU E8400	Уровни
52	1	2,93	5
9,35	2	2,88	6
4,06	3	2,8	7
3,01	4	2,66	8

Примечание: время вычислений в минуту.

Анализ метода и результаты работы. Из реального объекта была получена воксельная модель трёхмерной реконструкции формы с использованием тридцати изображений и 512^3 вокселей. Она не обладает хорошей степенью гладкости, чтобы выглядеть реалистично, поэтому для более точного вычисления нормалей был применён метод реконструкции с помощью стереопары. Для компактного описания и гладкости поверхности модель была преобразована в функциональное описание. Для этого потребовалось 104 функции возмущения. Иерархическая обработка с использованием структуры восьмеричного дерева значительно ускоряет время вычислений (табл. 1).

Коэффициент сжатия при преобразовании полигональных моделей в функциональные составляет более двух порядков, а воксельных — более трёх. Метод был протестирован для нескольких реальных объектов. С помощью данного метода возможно преобразование полигональных и воксельных моделей в функциональные объекты без потерь. Более того, для гладких криволинейных поверхностей качество изображения улучшится. Визуализированы объекты с помощью метода, описанного в [14], и с применением графических процессоров. Время преобразования из воксельных моделей в функциональные составило от нескольких миллисекунд до одной секунды. Тестирование производилось на процессоре Intel Core2 CPU E8400 3.0 GHz. В известных подходах преобразования трёхмерных моделей в неявные поверхности применяются итерационные методы, которые являются приближёнными и медленными. В предлагаемом методе преобразование в функционально базируемую модель происходит посредством строгого математического вычисления без итераций.

Заключение. В данной работе предлагается метод реконструкции реальных объектов из стереоизображений с применением воксельной структуры восьмеричного дерева и её преобразованием в функциональное описание на основе функций возмущения. Преобразование происходит путём математического вычисления, а не итерационно и с приближениями, которые приводят к частичной потере информации. Иерархическая обработка значительно сокращает время вычислений воксельной модели. Предложенные способ задания трёхмерных объектов и метод преобразования геометрических данных имеют преимущества перед известными подходами.

К основным достоинствам предлагаемых способа и метода следует отнести: простоту преобразования воксельных объектов в функциональное описание с быстрым поиском описывающих функций, а также существенное уменьшение количества данных для задания криволинейных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Butime J., Gutierrez I., Corzo L. G., Espronceda C. F.** 3D Reconstruction Methods, a Survey. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/1a63/9c74c0327c7982714b3f964fd09417ec4e9f.pdf> (дата обращения: 12.12.2019).

2. **Siudak M., Rokita P.** A Survey of Passive 3D Reconstruction Methods on the Basis of More than One Image. URL: http://mgv.wzim.sggw.pl/MGV23_3-4.057-117.pdf (дата обращения: 12.12.2019).
3. **Martin W. N., Aggarwal J. K.** Volumetric descriptions of objects from multiple views // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intell. 1983. **PAMI-5**, Iss 2. P. 150–158.
4. **Chien C. H., Aggarwal J. K.** Identification of 3D objects from multiple silhouettes using quadtrees octrees // Computer Vis. Graph. and Image Process. 1986. **36**, Iss. 2–3. P. 256–273.
5. **Niem W.** Robust and fast modeling of 3D natural objects from multiple views // SPIE Proceedings "Image and Video Processing II". 1994. **2182**. P. 388–397.
6. **Szeliski R.** Shape from rotation // Proc. of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'91). Maui, USA, 3–6 June, 1991. P. 625–630.
7. **Vedula S., Rander P., Saito H., Kanade T.** Modeling, combining, and rendering dynamic real-world events from image sequences // Proc. of the 4th Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM98). Gifu, Japan, 18–20 Nov., 1998. P. 326–332.
8. **Kuzu Ya., Rodehorst V.** Volumetric modeling using shape from silhouette. January 2001. URL: https://www.cv.tu-berlin.de/fileadmin/fg140/Volumetric_Modeling_using.pdf (дата обращения: 12.12.2019).
9. **Вяткин С. И.** Моделирование сложных поверхностей с применением функций возмущения // Автометрия. 2007. **43**, № 3. С. 40–47.
10. **Вяткин С. И., Долговесов Б. С.** Метод сжатия геометрических данных с применением функций возмущения // Автометрия. 2018. **54**, № 4. С. 18–25. DOI: 10.15372/AUT20180403.
11. **Вяткин С. И.** Метод распознавания лиц с применением скалярных функций возмущения и теоретико-множественной операции вычитания // Автометрия. 2016. **52**, № 1. С. 52–59. DOI: 10.15372/AUT20160107.
12. **Fua P.** A parallel stereo algorithm that produces dense depth maps and preserves image features // Machine Vis. Appl. 1993. **6**, N 1. P. 35–49.
13. **Vyatkin S. I.** Polygonization method for functionally defined objects // Intern. Journ. Automation, Control and Intell. Syst. 2015. **1**, N 1. P. 1–8.
14. **Вяткин С. И.** Метод рекурсивного поиска элементов изображения функционально заданных поверхностей // Автометрия. 2017. **53**, № 3. С. 53–57. DOI: 10.15372/AUT20170307.

Поступила в редакцию 12.12.2019

После доработки 25.09.2020

Принята к публикации 12.10.2020
