

Романюк А.Н.

Винницький національний технічний університет

Вяткин С.И.

Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук

Войтко В.В.

Винницький національний технічний університет

Романюк О.В.

Винницький національний технічний університет

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ СЦЕН НА ОСНОВЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Під час візуалізації складних сцен необхідні детальні 3D моделі, щоб надати користувачам відчуття занурення в навколишнє середовище. Традиційно ці моделі будуються з використанням засобів автоматизованого проектування для визначення геометрії та властивостей матеріалу. Але створення детальних моделей забирає багато часу, і також важко реалізувати відтворення всіх геометричних і фотометричних особливостей реального світу сцени. За допомогою комп'ютерного зору намагаються вирішити цю проблему шляхом вилучення геометрії і фотограмметрії із зображень реального світу сцени. Проте ці моделі все ще обмежені кількістю деталей під час відновлення сцени. Візуалізація на основі зображень генерує нові подання шляхом перерахунку набору образів навколишнього середовища без орієнтування на явні геометричні моделі. Відомі методи обмежують розмір і форму навколишнього середовища. У цій роботі визначено параметризацію чотирирівимірної пленоптичної функції, яка підходить для відбору проб і реконструкції довільних форм. Візуалізація на основі зображень базується на реконструкції безперервного подання пленоптичної функції, що складається з набору зразків дискретного зображення. Запропоновано простий і швидкий метод захоплення складних середовищ. Реалізований автоматичний алгоритм реконструкції пленоптичної функції. Перевага запропонованого підходу полягає в легкості захоплення навколишнього середовища, автоматизованій обробці даних, масштабованості в великих середовищах, підтримці довільно сформованих середовищ. Крім того, в запропонованому методі, порівняно з наявними методами, час обчислень і вимоги до пам'яті в кожному циклі зображення не залежать від складності моделі. З відповідною попередньою обробкою також можна виконувати реконструкцію для складних середовищ. Оскільки цикли зображення можуть бути довільної форми, можна створити середовища довільної форми. Вдалося отримати параметризацію 4D пленоптичної функції у вільному просторі. Пленоптична функція важлива для використання в області комп'ютерного зору, щоб отримати зображення сцени з будь-якої можливої позиції перегляду під будь-яким кутом огляду в будь-який момент часу.

Ключові слова: віртуальне середовище, пленоптична функція, рендеринг на основі зображень, візуалізація складних сцен, комп'ютерний зір.

Постановка проблеми. Приложения компьютерной графики, такие как виртуальная реальность, пошаговая демонстрация процедуры процесса или явления, пошаговый разбор, сквозной контроль, проход камеры при съёмке теле- или кинофильмов, показ изнутри и перемещение внутри трёхмерных объектов в компьютерной графике и компьютерных играх и так далее требуют детальных 3D-моделей их окружения. Традиционно такими средами являются созданные с использованием систем автоматизированного

проектирования задания геометрии и свойств материалов. Используя модель освещения, окружающая среда может быть представлена с любой точки зрения. Однако обычные методы моделирования, как правило, отнимают много времени и их не хватает для воссоздания подробной геометрии и особенностей световых эффектов, встречающихся в большинстве реальных объектов сцены. Фотографии реальных сцен могут помочь восстановить геометрические [1] и фотометрические свойства [2; 3]. Компьютерное зрение применяется

для создания моделей реального мира с помощью автоматического получения геометрии и фотограмметрии из изображения объектов реального мира. Эти методы основаны на стерео согласовании, которое часто зашумлено и имеет проблемы с надежностью сопоставления достаточного количества объектов при создании детализированных моделей сложных сцен. Поэтому актуальной является задача разработки новых методов и подходов формирования изображений в компьютерном зрении и графике.

Постановка задания. Цель работы – упрощение методов визуализации изображений с использованием технологии захвата сложных сред, базирующейся на автоматическом алгоритме реконструкции пленоптической функции и рендеринге изображений, что позволяет генерировать новые представления путем пересчета набора образов окружающей среды без использования явных геометрических моделей.

Объектом исследования является процесс визуализации изображений.

Предмет исследования – метод захвата сложных сред с использованием возможности реконструкции пленоптической функции.

Изложение основного материала исследования. Рендеринг на основе изображений создает новые виды окружения непосредственно из набора существующих образов, путем пересчета изображений для создания нового представления, избегая необходимости в явной геометрической модели. Параметризация луча в трехмерном пространстве задается положением (x, y, z) и направлением (θ, φ) . Излучение вдоль таких лучей в трехмерном пространстве называется пленоптической функцией [4]. Пленоптическая функция освещения является идеальной функцией, используемой в области компьютерного зрения, чтобы получить изображение сцены из любой возможной позиции просмотра под любым углом обзора в любой момент времени. Она фактически никогда не используется на практике в вычислительном отношении, но концептуально полезна для понимания других концепций в компьютерном зрении и графике [5].

Целью визуализации на основе изображений является реконструкция непрерывного представления пленоптической функции из набора образцов дискретного изображения [6]. На практике все методы являются подмножеством полной семимерной пленоптической функции. Ограничиваясь статическими сценами, отснятыми на дискретных длинах волн (например, красный,

зеленый, синий), можно уменьшить семимерную пленоптическую функцию до пятимерной [6]. Для этого используют изображения, дополненные значениями глубины при реконструкции пятимерной пленоптической функции (5D). Применяется эффективная операция деформации изображения, которая использует эталонное изображение для создания изображений для небольшой близлежащей области просмотра. Для реальных сред вычисляется глубина путем установления характерных соответствий между двумя цилиндрическими проекциями окружающей среды, захваченной с небольшой базовой линии. Однако большие окружающие среды требуют выборки большого количества изображений из близко расположенных объектов с известных точек зрения. Для свободных пространств можно еще больше уменьшить пленоптическую функцию до четырехмерного пространства (4D). Световое поле [7] и люмиграф [8] захватывают большое количество изображений с известных ракурсов и создают базу данных 4D световых лучей. Световое поле представляет собой вектор-функцию, которая описывает количество света, проходящего в каждом направлении через каждую точку пространства. Световое поле и люмиграф можно было бы объединить вместе в большие модели, но они будут ограничены регулярными областями, и это займет много времени. Полная 5D пленоптическая функция может, в теории, реконструировать большие, сложные окружающие среды. Однако представление 5D функций требует восстановления глубины, что трудно сделать точно и надежно для сложных сцен.

Необходимо разработать метод реконструкции 4D пленоптической функции для наблюдателя, движущегося в открытых пространствах в пределах большой и сложной окружающей среды при ограничении движения камеры в плоскости на уровне глаз. Для этого будем снимать образы окружающей среды, перемещая видеоканеру по нескольким путям, образуя нерегулярную сетку. Пересекаем записанные пути изображения и сшиваем вместе простые, замкнутые циклы изображения. Во время выполнения программы будут генерироваться произвольные ракурсы внутри каждого цикла изображений с помощью окружающих образов. Наблюдатель также сможет свободно перемещаться от одного объекта к другому. Таким образом, имея тайловую структуру с циклами изображения, сможем захватить и реконструировать окружающее пространство произвольного размера и формы с использованием

приблизительно постоянного размера памяти. Преимущества предлагаемого подхода заключаются в следующем:

- легкость захвата: будут захватываться сложные окружающие среды за несколько минут;
- автоматизированная обработка: вся обработка предполагается автоматической, за исключением оценки положения камеры, которая требует минимального вмешательства пользователя при инициализации;
- масштабируемость: метод сможет масштабироваться в больших средах. Реконструкция и алгоритм интерактивного отображения требуют только четко определенного локального подмножества захваченных данных;
- поддержка произвольно сформированных сред: так как циклы изображения могут быть произвольной формы, можно создать среды произвольной формы.

Описание метода. Параметризация. Осуществим параметризацию 4D пленоптической функции в свободном пространстве. Одна из возможностей заключается в параметризации всех потенциальных световых лучей, с помощью пересечения двух перпендикулярных плоскостей: произвольной горизонтальной плоскости формы, которая представляет все позиции наблюдателя и линейчатой поверхности, созданной с помощью заматающей вертикальной линии вокруг периметра открытого пространства, которое представляет собой область просмотра.

Параметризуются лучи света с помощью их пересечения с плоскостью наблюдателя (x, y) и с линейчатой поверхностью (u, v), создающей 4D пленоптическую функцию (x, y, u, v). Исходим из предположения, что взгляд наблюдателя удерживается приблизительно горизонтально, ограничиваем вертикальное поле зрения и игнорируем направления просмотра вверх и прямо вниз. Для того чтобы реконструировать непрерывное представление четырехмерной пленоптической функции, необходимо идеально выбрать все открытое пространство очень плотно. Однако это не практично, чтобы выбрать плоскость наблюдателя плотно.

В связи с этим, выберем плоскость наблюдателя, используя нерегулярную сетку всенаправленных последовательностей изображений. Каждая последовательность изображений – это 3D пленоптическая функция. Сетка адаптирована к размеру, форме и сложности окружающей среды. Пересекаем пути записанных последовательностей изображений и формируем циклы изображений в

плоскости наблюдателя. Для каждого закрытого цикла используем когерентность цикла изображения и искривление пикселей от границы цикла на реконструированный ракурс для произвольных точек зрения внутри цикла. Реконструкция также обеспечивает плавный визуальный переход, когда наблюдатель движется от одного цикла к следующему.

Предлагаемый подход можно рассматривать как обобщение шивки смежных пленоптических функций. В данном методе устраняются ограничения, связанные с положением камеры в параллельных плоскостях, например, в световом поле [7].

Цикл. Учитывая набор циклов изображения, цель алгоритма реконструкции заключается в создании новых плоских представлений об окружающей среде из произвольных точек зрения внутри цикла. Реконструируется новый ракурс путем объединения пикселей из всенаправленных изображений, содержащихся в ракурсе на уровне глаз (Forward-looking view frustum) с пикселями во всенаправленных изображениях, содержащихся в обратном взгляде (Reverse-looking frustum). Для ракурса внутри цикла проводим несколько линий сегментов через точку зрения, которые пересекают окружающий цикл (рис. 1). В каждом пересечении извлекаем из всенаправленных изображений радиальные линии пикселей, которые соответствуют направлению взгляда. Конечное реконструируемое изображение создается с помощью деформации (ворпинга – warping) и комбинирования извлеченных пикселей.

Строится новый образ сектор за сектором. На рисунке 1 показан процесс реконструкции среднего сектора для образца изображения (Sample image). Отрезок линии, соответствующий направлению обзора среднего сектора, пересекает окружающее пространство. Цикл изображения образуется, по крайней мере, в двух местах. Для невыпуклых циклов может быть больше двух пересечений. В таких случаях используем два ближайших к наблюдателю пересечения. Всенаправленные изображения, полученные в этих точках пересечения, – это пример среды вне цикла в том же направлении просмотра, но от двух различных центров проекции. Камера производит выборку сектора при определенном направлении просмотра с помощью радиальной линии пикселей. В сторону от вертикали дисклюзии (ситуация, когда ранее закрытый объект становится видимым), особенности окружающей среды, отобранные радиальной линией пары отличаются только радиальным

смещением. Если точка зрения совмещена с одним из центров проекции, то новый сектор – это плоская репроекция из этой радиальной линии. Но для того, чтобы реконструировать сектор для точки обзора в любом месте вдоль направления просмотра, необходимо установить отображение между радиальными линиями в двух всенаправленных изображениях. Используется это отображение для того, чтобы исказить две радиальные линии к плоской репроекции для текущей точки зрения и сместить их вместе.

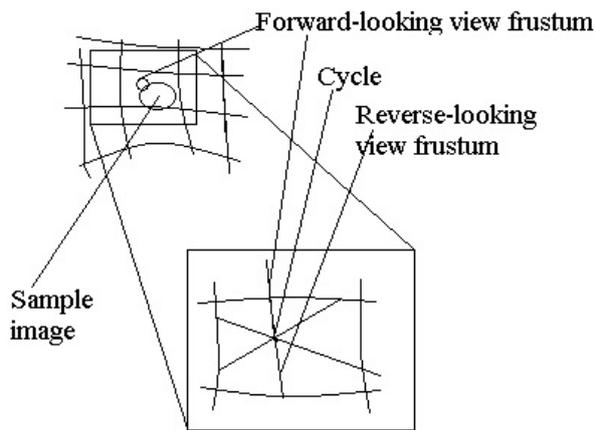


Рис. 1. Цикл

Чтобы вычислить положение камеры, разработан алгоритм оценки для калибровки камеры. В двух углах отслеживаемой области помещаются шесть, оснащенные маленькими яркими лампочками, и измеряется расстояние между шестами. Калиброванная камера удерживается на уровне фиксированной высоты, параллельно плоскости пола. Перед записью пользователь инициализирует оценку положения с помощью идентификации проекций лампочек в первом отсчете изображения. Затем, по мере движения камеры, алгоритм автоматически отслеживает лампочки и, используя триангуляцию, вычисляет положение камеры (x , y) и ориентацию (w) со средней ошибкой положения 0,5% во внутреннем пространстве комнаты. Для точки зрения внутри цикла изображения (рис. 1, 2), проводим несколько отрезков линии через точку зрения, которая пересекает окружающий цикл. На каждом перекрестке извлекаем из изображений радиальные линии пикселей, соответствующих направлению визирования. Окончательное реконструированное изображение создается путем деформации и объединения извлеченных пикселей. Поскольку известно, что камера движется по гладкой

траектории с приблизительно постоянной скоростью и частотой кадров захвата, компенсируем шум в оценке положения путем подгонки B-сплайнов к позициям камеры вдоль записанных траекторий. Далее вычисляется локальная средняя скорость трансляции и репроекции положения камеры на сплайновой кривой.



Рис. 2. Внутреннее пространство комнаты

Реконструкция. Как только изображения будут захвачены над сеткой в окружающем пространстве, создаются циклы изображения (рис. 1). График представляет собой сетку с путями пересечения в виде вершин и отрезков пути между двумя точками пересечения в виде ребер. Рекурсивно пересекаем график для определения всех циклов изображения. Для вычисления пересечений путей используется объектно-ориентированный ограничивающий параллелепипед. Путь состоит из последовательности следующих элементов: изображения, которые примерно равномерно распределены вдоль пути. Вычисляется дерево объектно-ориентированного ограничивающего параллелепипеда для каждого пути. Разделив его на два сегмента, окружающие каждый сегмент ориентированной границей параллелепипеда, продолжается процесс до тех пор, пока не появится небольшое количество изображений, остающееся в каждом узле. Чтобы найти пути пересечения, пересекаем путь дерева объектно-ориентированного ограничивающего параллелепипеда сверху вниз и затем находим пересекающиеся отрезки линии в узлах листьев дерева по перечислению.

Новый ракурс с произвольной точки зрения внутри цикла изображений состоит из реконструкции сектора за сектором пикселей всенаправленных изображений. Горизонтальная и вертикальная оси графика представляют параметрическое положение соответствующих объектов изображения. Деформируем соответствующие сегменты каждой радиальной линии до сектора в реконструированном изображении. Необходимо рассмотреть геометрию камеры при деформировании радиальных отрезков линии. Для всенаправленных изображений определяем проекционные положения p_1 и p_2 образца функции в секторе изображения. Вычисляем положение сектора изображения p_0 объекта для виртуального наблюдателя, используя подобные треугольники. Следующее выражение вычисляет p_0 , учитывая p_1 , p_2 и параметрическое положение (a) в зависимости от расстояния d между секторами всенаправленных изображений вдоль направления визирования:

$$p_0 = \frac{p_2}{\left(a \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) + 1 \right)} \quad (1)$$

Используя прямое отображение, совместимое с упорядочением пикселей радиальной линии [6], устраняем необходимость явно адресовать порядок видимости. Поскольку пиксели на изображении позади точки зрения, как правило, растягиваются во время преобразования, отображаем пиксели, используя фиксированный размер сплатов [9; 10]. В нашем случае сплаты на самом деле являются короткими отрезками линий. Чтобы заполнить вертикальные расхождения, просто используем более длинные, чем ожидалось, сплаты. Это равносильно заполнению разрывов с последним образцом фонового объекта. Уменьшаем количество оставшихся артефактов реконструкции путем фильтрации конечного изображения, используя Гауссово ядро свертки 3×3 . Как правило, направление просмотра не будет пересекать цикл изображения точно в центре проекции всенаправленного изображения. В этом случае извлекаем две радиальные линии, параллельные направлению вида, смешиваем их и продолжаем реконструкцию.

Так как может быть большое смещение между всенаправленными изображениями на противоположных сторонах цикла, то трудно достоверно идентифицировать соответствующие признаки в радиальном направлении линии

только из двух линий. Вместо этого полагаемся на временной когерентности всего цикла изображения для определения требуемых параметров. Выбираем произвольное всенаправленное изображение из цикла и используем метод обработки изображений для идентификации набора особенностей (например, точки, углы). Затем используем алгоритм отслеживания объектов из исходного изображения вокруг цикла, сохраняя только функции, которые успешно отслеживают все пути вокруг и имеют похожие начальные и конечные позиции изображения.

Чтобы получить положение объекта для конкретной радиальной линии, триангулируем отслеживаемые объекты на каждом изображении и используем следующие параметры: точки пересечения между триангулированными ребрами и радиальными линиями в качестве точек объекта для отображения. В криволинейной камере проецируемые прямые линии изгибаются. Для параболического зеркала эти кривые представляют собой дуги окружностей. Таким образом, для каждого изображения вычисляем триангуляцию Делоне отслеживаемых объектов и заменяем прямые ребра треугольников дугами. Каждая дуга обладает тем свойством, что она проходит через две вершины исходного ребра и пересекает зеркальную границу в двух точках на 180 градусов друг от друга.

Чтобы получить выражение для окружности, содержащей дугу, необходимо преобразовать две вершины исходного ребра триангуляции к каноническому пространству. В этом пространстве захваченное изображение имеет радиус равным единице и вершины повернуты так, что одна из них лежит вдоль оси X. Вершины представляются в виде $(x_0, 0)$ и (x_1, y_1) . Следующие выражения вычисляют окружность (c_x, c_y) радиуса r , проходящей через две вершины и пересекающей зеркальную границу, разделенную на 180 градусов:

$$c_x = \frac{x_0^2 - 1}{2x_0} \quad (2)$$

$$c_y = \frac{x_1 - x_0 + x_0(x_1^2 + y_1^2) - x_0^2 x_1}{(2x_0 y_1)} \quad (3)$$

$$r = \sqrt{1 + c_x^2 + c_y^2} \quad (4)$$

Пересекаем ребро дуги с радиальной линией, решая квадратичную задачу уравнения. Представляем радиальную линию лучом от начала координат через (t_x, t_y) и до края дуги на границе

окружности (c_x, c_y, r) . Точки пересечения – (t_x, t_y) , где t удовлетворяет уравнению:

$$(r_x^2 + r_y^2)t^2 - 2(c_x r_x + c_y r_y)t + (c_x^2 + c_y^2 - r^2) = 0 \quad (5)$$

На рис. 3 показана реконструкция для нескольких точек обзора посередине циклов изображения, где правильная реконструкция наиболее трудна.

Выводы. Представлен метод реконструкции на основе изображений виртуальной прогулки по 3D средам для наблюдателя, движущегося через свободное пространство в плоскости. Показана

параметризация 4D пленоптической функции. Рассмотрен быстрый и легкий захват образцов окружающей среды и автоматическая реконструкция четырехмерной пленоптической функции.

Эксперименты показывают, что параметризация 4D пленоптической функции эффективна для широкого круга применений. В сравнении с другими методами, время вычислений и требования к памяти в каждом цикле изображения не зависят от сложности модели. С соответствующей предварительной обработкой можно выполнять реконструкцию для сложных сред.



Рис. 3. Ракурсы посередине циклов изображения

Список літератури:

1. P. Debevec, C. Taylor, J. Malik. Modeling and rendering architecture from photographs. *SIGGRAPH'96*, New Orleans, LA, USA, August 4-9, 1996, P. 11–20.
2. Y. Yu, J. Malik. Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs, *Computer Graphics, SIGGRAPH'96*, New Orleans, LA, USA, August 4-9, 1996, P. 207–218.
3. Вяткин С.И., Романюк А.Н. Метод спектральной обработки геометрии трехмерных объектов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». Всеукраїнський науковий збірник*. 2019. № 1 (28)-2(29). С. 19–26. DOI:10.31474/1996-1588-2019-1-28-19-26.
4. Jin-Xiang Chai, Xin Tong, Shing-Chow Chan, Heung-Yeung Shum. Plenoptic Sampling. *SIGGRAPH'2000*, New Orleans, LA, USA, July 23–28, 2000, P. 307–318.
5. Tien-Tsin Wong, Chi-Wing Fu, Pheng-Arm Heng, Chi-Sing Leung. The Plenoptic Illumination Function. *IEEE Transactions on Multimedia (Volume: 4, Issue: 3, Sep 2002)*, P. 361–371. DOI: 10.1109/TMM.2002.802835.
6. L. McMillan, G. Bishop. Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System, *Computer Graphics SIGGRAPH'95*, Los Angeles California USA August, 1995, P. 39–46.
7. M. Levoy, P. Hanrahan. Light Field Rendering. *SIGGRAPH'96*, New Orleans, LA, USA, August 4-9, 1996, P. 31–42.
8. S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, M. F. Cohen. The Lumigraph. *SIGGRAPH'96*, New Orleans, LA, USA, August 4-9, 1996, P. 43–54.
9. Vyatkin S.I. / Вяткин С.И., Romanyuk A.N. / Романюк А.Н., Necheporyk M.L. / Нечипорук Н.Л., Roptanov V.I. / Роптанов В.И. The method of splatting the filter-based weighted average. *Modern engineering and innovative technologies. Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien. Issue 6. Part 1*, December 2018, Published by: Sergeieva&Co Karlsruhe, Germany. Technical sciences P. 44 -49. DOI: 10.30890/2567-5273.2018-06-01-065.
10. Вяткин С.И., Романюк А.Н. Адаптированный метод сплаттинга для медицинских приложений. *Збірник доповідей. Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерна графіка та розпізнавання зображень»*. Суми-Вінниця. 2019. С. 33–40. URL: https://drive.google.com/file/d/1e06nMRb0hIz1FX6_cBD7CKWafknSmj_a/view?usp=sharing.

Romanyuk O.N., Vyatkin S.I., Voitko V.V., Romanyuk O. V. RECONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL SCENES BASED ON IMAGES

When visualizing complex scenes, detailed 3D models are needed to give users a sense of immersion in the environment. Traditionally, these models are built using computer-aided design to determine the geometry and properties of the material. But creating detailed models is time consuming, and it is also difficult to do to reproduce all the geometric and photometric features of the real world scene. Using computer vision, they are trying to solve this problem by extracting geometry and photogrammetry from images of the real world of the scene. However, these models are still limited in detail when restoring the scene. Image-based rendering generates new views by recalculating a set of environmental images without a basis for explicit geometric models. Known methods limit the size and shape of the environment. In this work, the parametrization of a four-dimensional plenoptic function is determined, which is suitable for sampling and reconstruction of arbitrary shapes. Image-based visualization is based on the reconstruction of a continuous representation of the plenoptic function, consisting of a set of samples of a discrete image. A simple and fast method for capturing complex environments is proposed. An automatic algorithm for reconstructing the plenoptic function is implemented. The advantage of the proposed approach lies in the ease of capturing the environment, automated data processing, scalability in large environments, and support for arbitrarily formed environments. In addition, in the proposed method, in comparison with existing methods, the computation time and memory requirements in each image cycle do not depend on the complexity of the model. With appropriate pretreatment, reconstruction can also be carried out for complex environments. Because image loops can be arbitrary shapes, you can create environments of arbitrary shape. It was possible to obtain a parameterization of the 4D plenoptic function in free space. The plenoptic function is important for use in the field of computer vision in order to obtain an image of a scene from any possible viewing position at any viewing angle at any time.

Key words: virtual environment, plenoptic function, image-based rendering, visualization of complex scenes, computer vision.