

УДК 519.237.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ СО СТРУКТУРИРОВАННЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

Б. А. Алпатов, д.т.н, профессор кафедры АИТУ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-0373-6932, e-mail: alpatov.b.a@rsreu.ru

П. В. Бабаян, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой АИТУ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0003-4041-3101, e-mail: babayan.p.v@rsreu.ru

И. Е. Евтеев, инженер кафедры АИТУ РГРТУ, Рязань, Россия;

orcid.org/0000-0002-4647-9833, e-mail: evteev.i.e@rsreu.ru

Рассматривается задача разработки метода моделирования работы системы технического зрения со структурированным освещением. Целью работы является разработка программного обеспечения, позволяющего обеспечить моделирование работы системы технического зрения со структурированным освещением в реальном масштабе времени. Моделирование сцены производилось в симуляторе полетов, что позволило получить правдоподобное поведение летательных аппаратов. При помощи возможностей DirectX из симулятора извлекается информация о дальности до каждого пикселя изображения (карта дальности) и само изображение сцены. Карта дальности позволяет рассчитать места пересечения лучей структурированного освещения и объектов сцены. Для оптимизации расчета точек пересечения используется алгоритм Брезенхема. Найденные точки накладываются на полученное из среды моделирования изображение сцены. Показано, что данный метод позволяет добиться симуляции работы системы в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: моделирование, система технического зрения, структурированное освещение, DirectX, карта дальности, Z-буфер.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-128-136

Введение

В настоящее время в различных областях деятельности в производстве, медицине, компьютерной графике, робототехнике, техническом зрении активно используется трехмерное сканирование, информация о форме объектов реального мира. В связи с этим все более актуальной становится разработка программного обеспечения для моделирования этого процесса.

Системы оценки параметров трехмерных объектов могут быть построены на различных принципах, одним из которых является стереоскопический принцип. Стереоскопическая система включает две камеры, регистрирующие объект с разных ракурсов. Это позволяет, зная параметры камер стереоскопической системы, а также их взаимное расположение, определять трехмерные координаты различных точек объекта по изображениям, выделяя на них соответствующие точки (стереоотождествление) [1]. Однако, нерешенным остается ряд вопросов, связанных с принципиальными ограничениями данного метода, такими как стереоотождествление точек объектов, не обладающих ярко выраженной текстурой или имеющих большие нетекстурированные (однородные) области [2].

Помимо стереоскопических методов регистрации трехмерных объектов существуют методы с использованием структурированной подсветки, обеспечивающие возможность восстановления трехмерных координат точек объектов без ярко выраженной текстуры и с большими однородными областями [3]. В стереоскопической системе одну из камер стереопары можно заменить проектором и получить устройство регистрации трехмерных образов объектов, основанное на активном параллаксе принципе. В такой системе на объект проецируется некоторая картина (структурированная подсветка), и ее искажения, зависящие от формы объекта, регистрируются камерой [4]. В настоящее время разработано множество различных

вариантов картин для использования в системах структурированной подсветки, представляющих собой как серии изменяющихся картин (картины с временным мультиплексированием), так и неизменные картины с использованием различных вариантов цветовой кодировки [5]. Данные варианты характеризуются различным сочетанием суммарного времени регистрации, надежности, точности, разрешения [6], и выбор конкретной картины связан с областью применения системы, характеристиками регистрируемых объектов.

Теоретическая часть

Задача моделирования работы системы технического зрения весьма распространена. Чаще всего моделирование необходимо для разработки и тестирования алгоритмов [7, 8]. В настоящей работе рассматривается система технического зрения, содержащая структурированное освещение в виде сетки лазерных точек, что значительно усложняет задачу моделирования. Обычно, при разработке системы со структурированным освещением используют полунатурное моделирование [9, 10], но это не всегда возможно и целесообразно. Компьютерное моделирование в задачах разработки системы технического зрения со структурированным освещением ранее не применялось. В публикациях на эту тему моделирование использовалось только для оценки качества работы реальной системы [11].

В настоящей работе ставилась задача проектирования и моделирования системы технического зрения со структурированным освещением. Данная система разрабатывается для отработки алгоритма ориентирования взаимного расположения летательных аппаратов, поэтому к моделированию выдвигался ряд требований:

- реальное время;
- поведение летательных аппаратов в сцене должно быть приближено к натурному;
- должна присутствовать возможность корректного моделирования большого количества узконаправленных источников освещения (структурированного освещения).

Набор инструментов и качество симуляции полностью зависит от среды моделирования, поэтому выбор инструментов моделирования очень важен.

Выбор среды моделирования

Существует большое количество инструментов для компьютерного моделирования. Это и специальное ПО для создания трехмерной компьютерной графики (Blender, Cinema 4D, Autodesk 3ds Max и др.) и всевозможные симуляторы с открытым исходным кодом (Orbiter, Microsoft Flight Simulator, FlightGear) [12]. Эти две группы средств моделирования сильно отличаются, они используются принципиально разные подходы к рендерингу сцены. Симуляторы в своей основе имеют игровой движок, который позволяет получить высокую частоту кадров, но освещение в сцене эмулируется при помощи шейдеров и дополнительных текстур. Специальное ПО, напротив, моделирует корректное с физической точки зрения освещение, но работает очень медленно [13].

Ни в одной из вышеперечисленных сред моделирования не удалось получить результат, удовлетворяющий всем требованиям, поэтому было решено разделить процесс моделирования на два этапа. На первом производится моделирование сцены в симуляторе полетов, а на втором осуществляется расчет и наложение лучей структурированного освещения.

Получение данных из среды моделирования

Для моделирования любого освещения, в том числе и структурированного, необходима информация о глубине сцены (карта дальности). Карта дальности используется в трехмерной компьютерной графике для решения «проблемы видимости». Если пиксели двух рисуемых объектов перекрываются, то их значения глубины сравниваются, и рисуется тот, который ближе, а значение его удаленности сохраняется в буфер.

Карта дальности – это вспомогательные данные конвейера рендеринга сцены, поэтому получить ее не всегда возможно. В средах моделирования, построенных на базе API Direct3D 8 и ниже доступ к карте дальности невозможен. В Direct3D 9 ее можно получить путем сохране-

ния в буферную поверхность, после чего карту дальности можно переместить в оперативную память. Более современные API поддерживают прямой доступ к карте дальности.

Пусть при помощи средств DirectX получен массив карты дальности $z(x, y)$. Диапазон карты дальности ограничивается двумя плоскостями, ближней N и дальней F границами отсечения. Во время рендеринга для повышения точности представления информации о дальности z пересчитывается в соответствии с формулой:

$$z' = \frac{F + N}{2(N - F)} + \frac{1}{z} \left(\frac{-FN}{2(F - N)} \right).$$

В результате, отсчёты z' расположены более плотно у ближней границы отсечения, и с удалением от нее плотность уменьшается.

Для расчетов структурированного освещения карту дальности нужно привести к линейному виду. Линеаризовать карту дальности, хранящуюся в буфере размером b бит, можно с помощью следующего выражения:

$$z = \frac{-SFN}{z'(F - N) - SN},$$

где $S = 2^b - 1$.

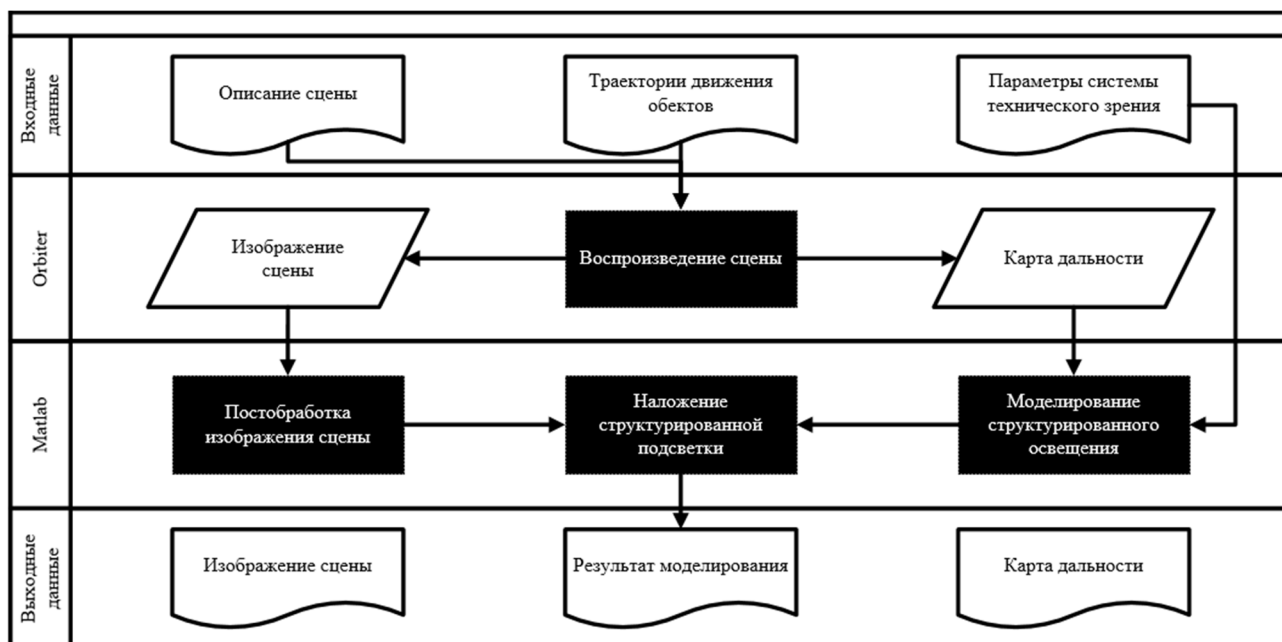


Рисунок 1 – Схема функционирования алгоритма моделирования работы системы технического зрения со структурированным освещением

Figure 1 – Flowchart of the algorithm for modeling the operation of the technical vision system with structured light

Помимо карты дальности из среды моделирования могут быть получены или изменены и другие данные полезные при моделировании:

- ориентация и координаты объектов в пространстве;
- поле зрения камеры;
- шаг рендеринга сцены;
- физические параметры объектов сцены.

С помощью полученных данных и параметров системы технического зрения моделирование структурированного освещения осуществляется в пакете прикладных программ MATLAB.

На рисунке 1 представлена блок-схема работы алгоритма моделирования работы системы технического зрения со структурированным освещением показывающая основные этапы работы алгоритма.

Постобработка изображений сцены

Моделирование в симуляторе полетов не позволяет моделировать некоторые специфические для решаемой задачи детали. Помимо этого, из-за несовершенства метода моделирования, получившиеся изображения могут содержать некоторые «артефакты». Все это должно быть исправлено на стадии постобработки.

Одной из основных причин использования этого этапа является искажения, которые непременно будут на реальной системе. Основные 2 типа искажений, которые могут сильно влиять на работу системы, следующие:

1. *Смаз изображения при повороте камеры* возникает из-за того, что экспонирование реальной камеры занимает некоторое время, за которое камера может повернуться на определенный угол. Для моделирования необходима информация о направлении камеры в каждый момент времени. Данные сведения легко получить из среды моделирования.

2. *Аддитивный шум*. Еще один неотъемлемый вид искажений в реальных камерах. Он возникает из-за термодинамического взаимодействия электронов с чувствительной частью матрицы камеры.

Разработка алгоритма моделирования структурированного освещения

Для получения результатов моделирования работы системы технического зрения со структурированным освещением необходимо, имея карту дальности и параметры оптической системы, рассчитать точки наложения структурированной подсветки.

Пусть камера имеет угол обзора α при пиксельном разрешении $H_x \times H_y$ и расположена в начале прямоугольной системы координат $Oxyz$. Дальняя и ближняя границы видимости камеры заданы плоскостями N и F соответственно. Подсветчик, создающий структурированное освещение, находится в некоторой точке P с координатами (x_0, y_0, z_0) и расположен вдоль направляющего вектора $q\{m; n; p\}$.

В зависимости от расположения и направления лазера могут быть следующие варианты:

1. Луч подсветчика не попадет в поле зрения камеры. В этом случае нет необходимости рассчитывать точку наложения структурированной подсветки.

2. Подсветчик и камера находится в одной точке пространства и направлены в одну сторону. Тогда проекция этого луча на сетку пикселей будет иметь только одну точку. Данный вариант в действительности невозможен, но может использоваться для проверки правильности алгоритма.

3. Луч подсветчика попадает в поле зрения камеры. Это наиболее общий случай, представленный на рисунке 1.

Зная точки входа $A(x, y, z)$ и выхода $B(x, y, z)$ луча подсветчика в поле зрения камеры можно рассчитать проекции этих точек на пиксельную сетку:

$$x' = \frac{Hx}{z \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} + \frac{Hx}{2}; y' = \frac{Hy}{z \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} + \frac{Hy}{2}.$$

Между пикселями A' и B' при помощи алгоритма Брезенхэма можно провести линию, т.е. найти все пиксели, в которых луч подсветчика может попасть на поверхность.

После этого необходимо определить дальность для каждого пикселя прямой $A'B'$. Из известных пиксельных координат XU необходимо получить положение в начальной системе координат xyz . Дополнив уравнения прямого преобразования уравнением прямой, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} x' = \frac{Hx}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} + \frac{Hx}{2}, \\ \frac{x-x_0}{m} = \frac{y-y_0}{n} = \frac{z-z_0}{p}, \\ y' = \frac{Hy}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} + \frac{Hy}{2}. \end{cases} \quad (1)$$

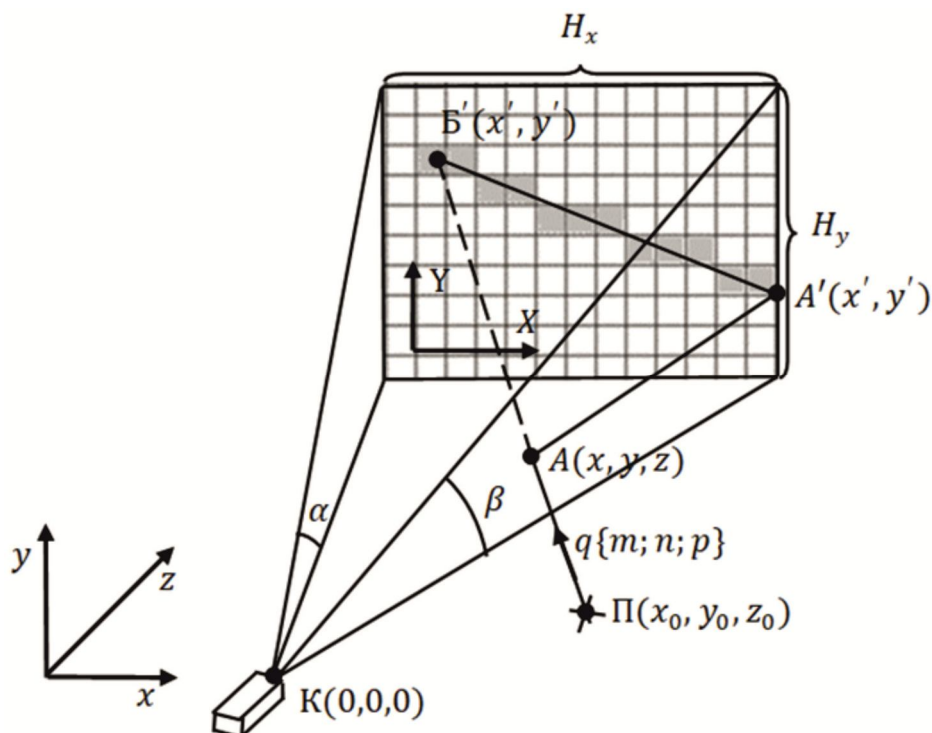


Рисунок 2 – Схема системы технического зрения со структурированным освещением
Figure 2 – The scheme of a technical vision system with a structured light

Решив систему уравнений (1) относительно переменных глобальной системы координат, получим выражения для расчета положения пикселей в системе координат xuz :

$$\begin{aligned} x &= \frac{(H_x - 2x')(px_0 - mz_0)}{H_x p - 2px' + 2mH_x \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}, \\ y &= \frac{(H_x - 2y')(py_0 - nz_0)}{H_y p - 2py' + 2nH_y \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}}, \\ z &= \frac{2H_x H_y (nx_0 - my_0) \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}}{mH_x \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - 2H_x my' \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - nH_x H_y \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2} + 2H_y nx' \operatorname{ctg} \frac{\beta}{2}}. \end{aligned}$$

В зависимости от координат и направления луча подсветчика горизонтальное m или вертикальное n приращения вектора q могут быть равны нулю. Поэтому для расчета z лучше использовать одно из следующих уравнений:

$$z = \begin{cases} \frac{2H_x(-px_0 + mz_0)\operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2}}{H_x p + 2px' + 2mH_x \operatorname{ctg}\frac{\alpha}{2}}, & \text{при } m = 0, n \neq 0, \\ \frac{2H_y(-py_0 + nz_0)\operatorname{ctg}\frac{\beta}{2}}{H_y p + 2py' + 2nH_y \operatorname{ctg}\frac{\beta}{2}}, & \text{при } n = 0, m \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Применив выражение (2) для каждого пикселя прямой $A'B'$, получим вектор $\bar{L}(x', y', z)$. Данный вектор полностью описывает все возможные точки наложения луча структурированной подсветки на поверхность. Путем перебора элементов вектора $\bar{L}$ можно определить пиксель, в котором луч впервые пересечет поверхность. Найденный пиксель и будет искомым местом наложения луча структурированной подсветки.

Экспериментальные исследования

Выше уже упоминалось, что компьютерное моделирование крайне редко применяется в задачах моделирования системы технического зрения со структурированным освещением, поэтому материала для сравнения данного метода с другими подходами фактически нет. Сравнение с классическими вариантами рендеринга не имеет смысла из-за совершенно разных подходов к моделированию из чего вытекает сильно отличающиеся результаты моделирования. Поэтому в качестве экспериментальных исследований проведен анализ разработанного алгоритма при разных параметрах моделирования.

В ходе экспериментов выполнена оценка зависимости скорости отрисовки кадров сцены от двух основных параметров, влияющих на производительность – разрешения изображения и количества лучей структурированного освещения. Помимо этого, оценивалось влияние стадии постобработки (производилось наложение искажений) на производительность алгоритма.

Исследования проводились на 3 сценариях. Среднее время моделирования кадра рассчитывалось как среднеарифметическое из 900 кадров (300 кадров из каждого сценария). Ближняя граница отсечения была установлена на дистанции 0,1 м, дальняя – на 500 м. Угол обзора камеры 10° . На изображение были добавлены все виды, описанные в соответствующем разделе, искажений:

1. Смаз изображения соответствует вращению камеры на 10° за 1 с.
2. Аддитивный шум. Использовался белый гауссовский шум с дисперсией 0,001.

Эксперименты проводились на ПЭВМ с операционной системой Windows 10, на базе процессора Intel Core i7-3770 с оперативной памятью объемом 16 Гб. В качестве вычислительной среды выполнения использовался пакет прикладных программ MATLAB версии R2017a.

На рисунке 5 приведен пример результата моделирования работы системы технического зрения со структурированным освещением. На нем изображен самолет со спроецированными на него лучами структурированной подсветки. Видно, что положение точек зависит от формы объекта и их удаленности. Для наглядности на рисунке 6 приведена карта дальности, которая использовалась при моделировании сцены на рисунке 5.

На основании полученных результатов, приведенных на рисунках 3-4 можно сделать следующие выводы:

- среднее время моделирования кадра растёт пропорционально квадрату разрешения моделируемого изображения. Это объясняется тем, что большая часть времени затрачивается на копирование изображения в оперативную память для обмена.

- зависимость среднего времени кадра от количества лучей структурированного освещения почти линейна. В реальных задачах обычно требуется от 10 до 1000 лучей, время моде-

лирования кадра при этих значениях позволяет получить частоту кадров около 10 Гц, что приемлемо для работы системы в реальном масштабе времени.

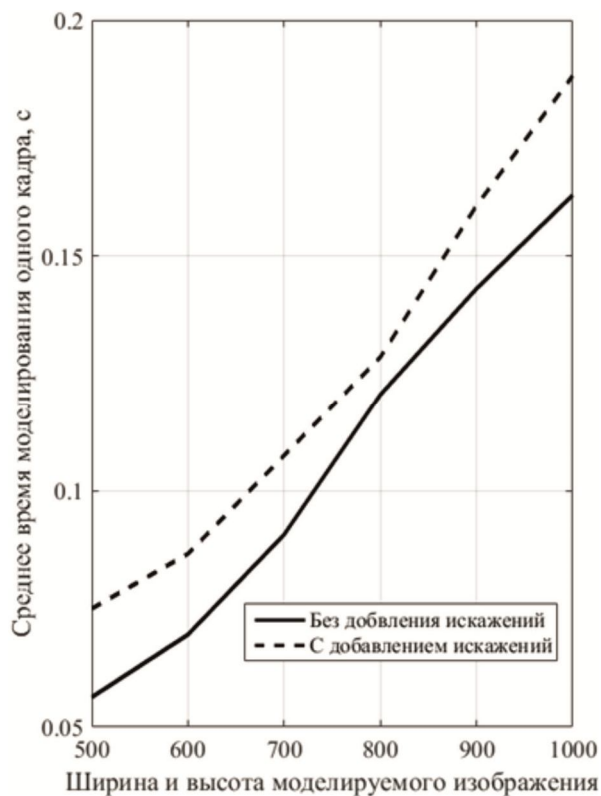


Рисунок 3 – График зависимости времени моделирования одного кадра от разрешения изображения
Figure 3 – Plot of simulation time of one frame on image resolution

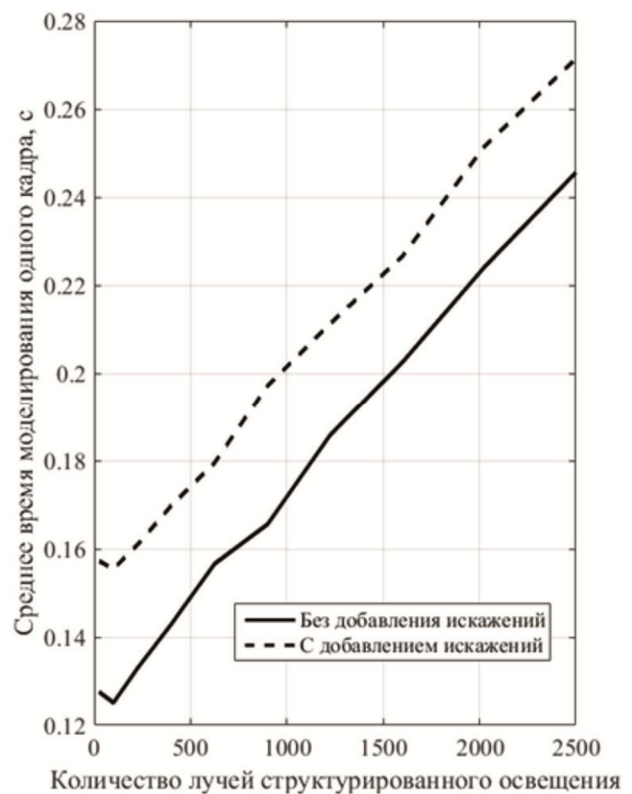


Рисунок 4 – График зависимости времени моделирования одного кадра от количества лучей структурированного освещения
Figure 4 – Plot of simulation time of one frame from the number of rays of structured light

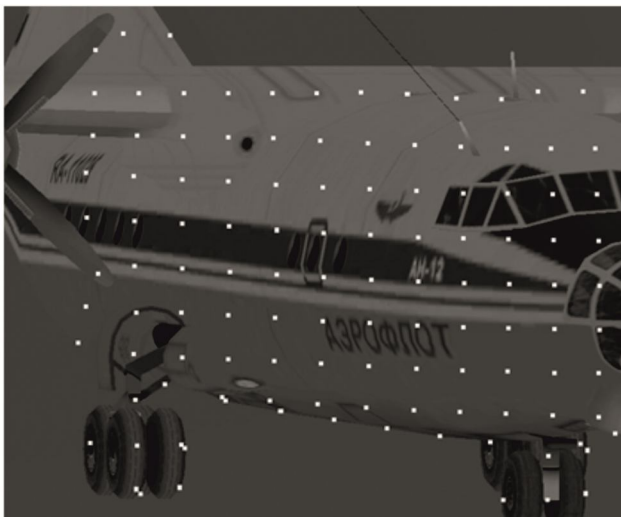


Рисунок 5 – Результат моделирования работы системы технического зрения со структурированным освещением
Figure 5 – The result of modeling the operation of the technical vision system with structured light

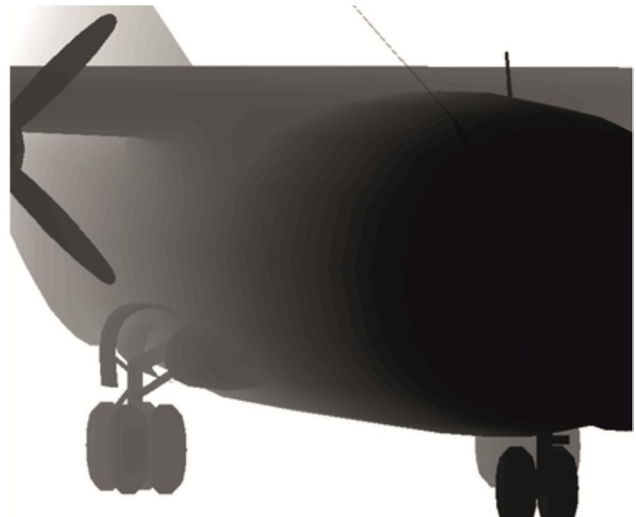


Рисунок 6 – Изображение карты дальности (более яркие участки соответствуют большому удалению)
Figure 6 – Depths map image (brighter areas correspond to greater distance)

Заключение

В ходе проведения работы разработано программное обеспечение, позволяющее обеспечить моделирование работы системы технического зрения со структурированным освещением.

Экспериментальные исследования подтвердили эффективность рассмотренного подхода к моделированию. Показано, что применение разработанного алгоритма позволяет осуществить моделирование структурированного освещения в реальном масштабе времени.

Библиографический список

1. Hartley R. I., Zisserman A. Multiple View Geometry. Cambridge University Press. Cambridge, 2000.
2. Scharstein D., Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two frame stereo correspondence algorithms // International Journal of Computer Vision. 2002, vol. 47(1-3), pp. 7-42
3. Salvi J., Pages J., Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems. Pattern Recognition. 2004, vol. 37(4), pp. 827-849.
4. Geng J. Structured-light 3d surface imaging: a tutorial. Advances in Optics and Photonics. 2011, vol. 3, pp. 128-160.
5. Zhang S., Huang P. S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement. Optical Engineering. 2006, vol. 45.
6. Garcia R., Zakhov A. Projector domain phase unwrapping in a structured light system with stereo cameras. 3DTV Conference, 16-18 May 2011, Antalya, Turkey. 2011, pp. 1-4.
7. Алпатов Б. А., Муравьев В. С., Стротов В. В., Фельдман А. Б. Исследование эффективности применения алгоритмов анализа изображений в задаче навигации беспилотных летательных аппаратов. Цифровая обработка сигналов – 2012. – № 3 – С. 29-34
8. Алпатов Б. А., Бабаян П. В., Коблов Ю. С., Муравьев В. С., Стротов В. В., Фельдман А. Б. Автоматизация разработки и исследования алгоритмов машинного зрения для навигации беспилотных летательных аппаратов на базе специализированного программного комплекса // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 3. – С. 85-91.
9. Liu Y., Lin T. Feature enhancement for a defocusing structured-light 3-D scanning system. Optical Engineering, 57, 2018.
10. Tang Suming, Song Zhan, Jiang Hualie, Nie Lei. Three-dimensional surface reconstruction via a robust binary shape-coded structured light method. Optical Engineering. 56. 2017.
11. Rachakonda P.K., Muralikrishnan B., Sawyer D. Sources of errors in structured light 3D scanners. Defense + Commercial Sensing, 2019.
12. Price E.R., Egan G.K. Real-time UAV visualization using a Flight Simulator. AIAC12, 2007. 7 p.
13. Фролов В., Галактионов В., Трофимов М. Сравнительный анализ современных рендер-систем для 3ds Max // Труды 24-й Международной конференции по компьютерной графике и зрению ГрафиКон'2014. GraphiCon. Академия архитектуры и искусств ЮФУ Ростов-на-Дону, 2014. – С. 43-46.

UDC 004.724

MODELING THE OPERATION OF TECHNICAL VISION SYSTEM WITH STRUCTURED LIGHT

B. A. Alpatov, Dr. Sc. (Tech.), full professor, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-0373-6932, e-mail: alpatov.b.a@rsreu.ru

P. V. Babayan, Ph.D. (Tech.), assistant professor of RSREU, Head of the Department AITC, RSREU, Ryazan, Russia; orcid.org/0000-0003-4041-3101, e-mail: babayan.p.v@rsreu.ru

I. E. Evteev, engineer of AITC Department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0002-4647-9833, e-mail: evteev.i.e@rsreu.ru

The problem of developing a method for modeling the operation of technical vision system with structured light is considered. The aim of this work is to develop software that allows you to simulate the operation of technical vision system with structured light in real time. Simulation of the scene was performed in a flight simulator, which allowed us to get plausible behavior of aircraft. Using DirectX capabilities, the simu-

lator extracts information about the distance to each pixel of an image (depths map) and the scene image itself. Range map allows you to calculate the intersection of structured light beams and scene objects. To optimize the calculation of intersection points, Bresenham's algorithm is used. The found points are superimposed on the scene image obtained from simulation environment. It is shown that this method allows achieving the simulation of system operation in real time.

Key words: simulation, technical vision system, structured light, DirectX, depths map, Z-buffer.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-128-136

References

1. Hartley R. I., Zisserman A. *Multiple View Geometry*. Cambridge University Press. Cambridge, 2000.
2. Scharstein D., Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*. 2002, vol. 47(1-3), pp. 7-42
3. Salvi J., Pages J., Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*. 2004, vol. 37(4), pp. 827-849.
4. Geng J. Structured-light 3d surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. 2011, vol. 3, pp. 128-160.
5. Zhang S., Huang P. S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement. *Optical Engineering*. 2006, vol. 45.
6. Garcia R., Zakhov A. Projector domain phase unwrapping in a structured light system with stereo cameras. *3DTV Conference*, 16-18 May 2011, Antalya, Turkey. 2011, pp. 1-4.
7. Alpatov B. A., Muraviev V. S., Strotov V. V., Feldman A. B. Research of effectiveness of image analysis algorithms in the problem of unmanned aerial vehicles navigation. *News of SFU. Technical science*. 2012, no. 3, pp. 85-91.
8. Alpatov B. A., Babayan P. V., Koblov Yu. S., Muraviev V. S., Strotov V. V., Feldman A. B. Automatization of development and investigation computer vision algorithms for navigation of unmanned aerial vehicles on the basis of the specialized software. *News of SFU. Technical science*. 2012, no. 3, pp. 85-91.
9. Liu Y., Lin T. Feature enhancement for a defocusing structured-light 3-D scanning system. *Optical Engineering*, 57, 2018.
10. Tang Suming, Song Zhan, Jiang Hualie, Nie Lei. Three-dimensional surface reconstruction via a robust binary shape-coded structured light method. *Optical Engineering*. 56. 2017.
11. Rachakonda P.K., Muralikrishnan B., Sawyer D. *Sources of errors in structured light 3D scanners*. Defense + Commercial Sensing, 2019.
12. Price E.R., Egan G.K. *Real-time UAV visualization using a Flight Simulator*. AIAC12, 2007. 7 p.
13. Frolov V., Galaktionov V., Trofimov M. Comparative analysis of modern render systems for 3ds Max. *Proceedings of the 24th international conference on computer graphics and vision grafion ' 2014*. GraphiCon. Academy of architecture and arts of Rostov-on-don. 2014, pp. 43-46.