

УДК 621.397.6

И. А. ГЕРГЕЛЬ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКЦИИ 3D МОДЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ДЛЯ НАВИГАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Представлен подробный обзор актуальных методов компьютерного зрения, применяемых для реконструкции 3D моделей поверхности по серии изображений с целью выявления основных достоинств и недостатков. Произведен анализ методов с целью выявления особенностей исследуемых поверхностей, для реконструкции которых каждый из методов даст наилучший результат. На основе проведенного обзора выбран наиболее соответствующий задачам реконструкции модели поверхности в условиях съемки рельефа местности с борта беспилотного летательного аппарата алгоритм для реализации и оценки точности.

Ключевые слова: *оптическая система, Ламбертовская модель, стереопара, Фурье-образ, глубина резкости, фоточувствительная матрица, метод триангуляции, факторизация матрицы.*

Введение

Повышение быстродействия, резкий рост вычислительных ресурсов персональных компьютеров (оперативной памяти и дискового пространства) и доступность вычислительных средств в настоящее время открывают новые возможности в области цифровой обработки изображений и их практической применимости в сферах навигации, робототехники, технологиях геоинформационных систем. Ранее усилия сосредотачивались на быстрых, однопроходных алгоритмах с минимальными затратами вычислительных ресурсов, которые не могли обеспечить глубокой интеллектуальной переработки поступающей видеoinформации [1]. В настоящее время методы, основанные на преобразовании Фурье, которые ранее мало использовались в обработке изображений из-за больших вычислительных затрат и расхода ресурсов, сейчас стали стандартной частью систем мультимедиа. В условиях быстрого роста производительности процессоров и объема памяти запоминающих устройств на персональном компьютере возникает возможность разработки алгоритмов и аппаратно-алгоритмических комплексов, обеспечивающих детальную переработку видео данных от исходных изображений, до символического описания сцены, как перечня распознанных объектов, их положения, перемещений, поведения и изменения.

Задача восстановления трехмерных сцен в настоящее время интенсивно разрабатывается большим числом исследователей и организаций (Autodesk, Eos Systems Inc, Image Master, Massachusetts Institute of technology, AgiSoft LLC, КБ «Панорама»,

NASA) [2, 3]. Область применения этих алгоритмов также чрезвычайно широка. Это задачи навигации судов, роботов и управления автомобилем, предотвращение столкновений [4], контроль соблюдения дистанции, лабораторные и промышленные системы измерения. Широкое применение алгоритмы восстановления трехмерных сцен в последнее время находят также в аэрокосмической отрасли. Здесь следует упомянуть совместный Советско-Американский проект РАМОС, конца 1980-х – начала 1990-х годов, стерео камеру, разработанную для Российского Марсианского зонда 1996 г. в Германии [5], спутники серии EOS-AM/PM Terra, Aqua (сканеры MISR, ASTER).

Известно большое количество методов и алгоритмов, однако все они имеют ограниченные области применения и подходят не для всех видов поверхностей. В целом алгоритмы восстановления трехмерных поверхностей называют "Shape from X" (восстановление формы из X), где X может принимать разные значения. Основными подклассами этой большой группы алгоритмов являются:

а) восстановление 3D модели поверхности по одиночному изображению на основе анализа изменения яркости (Shape from Shading). Как правило, используется ламбертовская модель рассеяния света объектом;

б) восстановление 3D модели поверхности по набору изображений, снятых неподвижной камерой при различной степени расфокусировки; фокусировка на фрагменты сцены, расположенные на различном расстоянии от камеры (Shape from Focusing and Defocusing);

в) восстановление 3D модели поверхности из

стерео пары изображений (Shape from Stereo);

г) восстановление 3D модели поверхности из последовательности изображений, снятых с разных позиций и в разные моменты времени (Shape from Motion). Часто положения камеры тоже считаются неизвестными и восстанавливаются в ходе решения задачи;

д) восстановление 3D модели поверхности на основе последовательности изображений, снятых при фиксированном расположении камеры с различной степенью оптического увеличения (Shape from Zoom).

Рассмотрим подробнее эти методы, их достоинства и недостатки для дальнейшего анализа.

Алгоритмы восстановления 3D модели поверхности по одиночному изображению на основе анализа изменения яркости

Основной принцип метода Shape from Shading это восстановление трехмерной формы объекта по его закраске. Под закраской объекта будем понимать плавное изменение яркости между точками объекта. Именно плавное, поскольку резкое изменение яркости соответствует либо границе объекта, либо тени от другого объекта.

Входными данными для этих алгоритмов является одно серое полутоновое изображение сцены. Среди факторов, влияющих на яркость точки поверхности объекта, можно выделить основные:

- а) свойства и расположение источников света;
- б) характеристики поверхности, определяющие ее отражающие свойства;
- в) ориентация участка поверхности, соответствующего данной точке в пространстве.

Простейшей моделью взаимодействия света с поверхностью является модель Ламберта [6], соответствующая "матовым" объектам, отражающим свет во всех направлениях одинаково. Она основана на том обстоятельстве, что для ламбертовых поверхностей яркость в каждой точке не зависит от положения наблюдателя и пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением на источник освещения.

Математически задача восстановления модели поверхности методом Shape from Shading описывается следующим образом [6]. Выберем систему координат (x, y, z) так, чтобы плоскость xy была параллельна плоскости изображения, а ось z была направлена к наблюдателю. Тогда поверхность можно описать функцией возвышений $Z(x, y)$. Вектор нормали к поверхности $Z(x, y)$ тогда записывается в виде:

$$n = (n_x n_y n_z) =$$

$$= \left(\frac{p}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \frac{q}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \right),$$

$$p(x, y) = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial x}, \quad (1)$$

$$q(x, y) = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial y}.$$

Здесь p и q – компоненты вектора градиента поверхности в направлении x и y соответственно.

Пусть сцена освещается плоскопараллельным пучком в направлении:

$$s = (s_x s_y s_z) =$$

$$= \left(\frac{p_s}{\sqrt{1+p_s^2+q_s^2}} \frac{q_s}{\sqrt{1+p_s^2+q_s^2}} \frac{1}{\sqrt{1+p_s^2+q_s^2}} \right),$$

$$p_s(x, y) = \frac{\cos \tau \cdot \sin \Theta}{\cos \Theta}, \quad (2)$$

$$q_s(x, y) = \frac{\sin \tau \cdot \sin \Theta}{\cos \Theta},$$

где Θ – угол между направлением на источник излучения и осью z (зенитный угол);

τ – угол между проекцией направления на источник излучения от объекта на плоскость xy и осью x (азимутальный угол).

Тогда для изображения $B(x, y)$ в предположении ламбертового рассеяния можно записать [6]:

$$B(x, y) = A \cdot \rho_L (\vec{n}, \vec{s}) = A \cdot \rho_L \cdot R(p, q) =$$

$$= A \rho_L \frac{\cos \Theta + p \cdot \sin \Theta + q \cdot \sin \tau \cdot \sin \Theta}{\sqrt{1+p^2+q^2}}, \quad (3)$$

где A – освещенность, создаваемая источником излучения в плоскости xy ;

ρ_L – альbedo поверхности для ламбертовского рассеяния.

Уравнение (3) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение относительно $Z(x, y)$ в частных производных с переменными коэффициентами (из-за $B(x, y)$). В случае неламбертовского рассеяния, правая часть (3) принимает более сложный вид [6]:

$$B(x, y) = A \rho_L (\vec{n}, \vec{s}) + A \rho_{SL} e^{\frac{\beta^2}{2\sigma^2}} +$$

$$+ A \rho_{SS} \delta(\Theta_i - \Theta_r) \delta(\tau_i - \tau_r), \quad (4)$$

где $\beta = \arccos([\vec{n}, \vec{s}])$ – угол между нормалью к поверхности и биссектрисой угла между направлениями на источник освещения s и точку изображения b ;

σ – ширина диффузной части specularного рассеяния (specular lobe);

Θ_i, τ_i и Θ_r, τ_r – зенитный и азимутальные углы источника излучения и направления зрения (точки изображения) соответственно.

Последнее слагаемое в (4) отвечает за зеркальную компоненту specularного рассеяния (specular spike), которая отлична от нуля только в очень узком диапазоне углов в направлении зеркального отражения на малой плоской площадке, касательной к поверхности $Z(x,y)$ в точке (x,y) . Одним из простейших методов реализации алгоритма Shape from Shading является линейный метод Пентланда [7]. Уравнение (3) линеаризуется и, с учётом (1), принимает вид:

$$V(x,y) = \frac{B(x,y)}{A\rho_L} - \cos\Theta = \frac{\partial Z}{\partial x} \cos\tau \cdot \sin\Theta. \quad (5)$$

От обеих сторон выражения (5) берется преобразование Фурье. Тогда Фурье-образ поверхности Z может быть выражен в явном виде:

$$F_z(\varepsilon, \eta) = \frac{F_B(\varepsilon, \eta)}{2i\pi(\varepsilon \cdot \cos\tau \cdot \sin\Theta + \eta \cdot \sin\tau \cdot \sin\Theta)}. \quad (6)$$

Путем взятия обратного преобразования Фурье, получается форма поверхности $Z(x,y)$. Детальный обзор современных алгоритмов по этой тематике приводится в [8]. В [9] дан сравнительный анализ погрешностей этих алгоритмов. Основными недостатками алгоритмов "Shape from Shading" являются требования постоянства альbedo по всей сцене и априорного знания закона рассеяния (то есть двунаправленной функции рассеяния BDRF5), а также, потеря информации об абсолютных размерах и расстояниях. Однако, в ряде случаев, эти алгоритмы успешно использовались для решения практических задач, например для расчета формы Лунной и Марсианской поверхности на основе снимков [10]. Достоинством таких алгоритмов является возможность получения результата на основании единственного изображения. Знание точных условий освещения, что характерно для изображений планет и астероидов, существенно облегчает задачу, и повышает точность результатов. В случае, когда допущения в определении освещения не соответствуют действительности, оценка направления освещения дает неверный результат, и приводит к неправильному восстановлению формы поверхности с помощью алгоритмов Shape from Shading.

Существуют методы, позволяющие в некоторых случаях применять алгоритмы типа "Shape from Shading" для сцен с неодинаковым альbedo, описанные, например [11]. В этой работе сначала оценивается величина альbedo с помощью локальных методов для каждой точки изображения, затем изображение сегментируется по величине альbedo, и значения пикселей исходного изображения делятся на средние значения альbedo по соответствующим сегментам, после чего используется обычный алгоритм восстановления формы для постоянного альbedo, равного единице.

При анализе сложных сцен, алгоритмы этой группы тоже играют важную роль. Пусть сложная сцена городского типа включает объект X , сложной формы из неокрашенного бетона, не содержащий ярко выраженных ребер и углов, имеющий плавные, округлые поверхности; в простейшем случае, шар. Понятно, что восстановить всю сцену с помощью алгоритмов "Shape from Shading" не удастся. Однако восстановить форму объекта X с помощью триангуляции на основе стерео изображений или последовательности изображений тоже не удастся, поскольку на объекте X отсутствуют ярко выраженные характерные точки и текстуры. В этом случае единственный выход заключается в том, чтобы выделить такой объект из изображения сцены и применить для него один из алгоритмов типа "Shape from Shading".

Алгоритмы восстановления 3D модели поверхности по набору изображений, снятых неподвижной камерой при пошаговой фокусировке на фрагментах сцены и различной степени расфокусировки

Алгоритмы восстановления 3D модели поверхности по фокусировке и дефокусировке, основываются на конечности глубины резкости оптических систем. Действительно, пусть расстояние до точки объекта равно z , а фокусное расстояние объектива – f , тогда изображение этой точки будет резким только в случае, когда выполняется соотношение тонкой линзы:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z} + \frac{1}{L}, \quad (7)$$

где L – расстояние от линзы до плоскости изображения.

Так как для неплоского объекта расстояния от объектива до его различных точек разные, то оптическая система может быть наведена на резкость только для части точек объекта.

Методы восстановления по фокусировке основаны на управлении фокусировкой камеры таким образом, чтобы найти, при каких параметрах фокусировки, достигается резкое изображение различных точек объекта. Достижимое этими методами пространственное разрешение сцены, вдоль оси камеры (оси z), может быть оценено, исходя из выражения для глубины резкости [12]:

$$\delta z = \frac{z^2}{f_r} \Delta \Rightarrow \delta \left(\frac{1}{z} \right) = \frac{\Delta}{f_r}. \quad (8)$$

где r – радиус входного зрачка объектива;

Δ – диаметр кружка в плоскости изображения, которым представляется точка объекта (в цифровых

системах изображение можно считать резким, если Δ меньше размера пикселя фоточувствительной матрицы).

Заметим, что точность определения величины $1/z$, определяется только свойствами оптической системы, и не зависит от z .

В [13] предлагается алгоритм для нахождения глубины сцены по фокусировке, отличающийся от ранее известных, существенно большей точностью. В качестве меры сфокусированности в точке изображения, выбиралась величина M_2 :

$$M_2 = \iint |\nabla F(x, y)|^2 dx dy, \quad (9)$$

с оператором градиента Собела [14], который вычисляется следующим образом:

$$G(x, y) = |\nabla F(x, y)| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} G_x &= (A_2 + 2A_3 + A_4) - (A_0 + 2A_7 + A_6), \\ G_y &= (A_0 + 2A_1 + A_2) - (A_6 + 2A_5 + A_4), \end{aligned} \quad (11)$$

A – исходное изображение;

G_x, G_y – два изображения, где каждая точка содержит приближенные производные элементов окна по x и по y для оператора Собела:

$$\begin{pmatrix} A_0 & A_1 & A_2 \\ A_7 & F(i, j) & A_3 \\ A_6 & A_5 & A_4 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Практически выражение (9) вычислялось, как среднее по окну 40×40 пикселей от величин (10), посчитанных для каждой точки окна (i, j) . Оператор Собела (10) вычисляется по окну 3×3 , как показано в (12).

Поскольку вычисление глубины сцены из фокусировки требует плотного взаимодействия алгоритма с мотором камеры, управляющим фокусировкой, то, в силу линейности зависимости между позицией мотора и смещением объектива, а также в виду требования предварительной калибровки камеры, результаты приводятся относительно отсчетов позиции мотора (цифровое управление).

В [6] рассматривается достигнутая относительная точность измерения расстояния. Она составила 0,1 процента при расстоянии до объекта 120 см, и прецизионной камере с отношением сигнал/шум 400/1, фокусным расстоянием от 10 мм до 130 мм, с 11100 шагами мотора, и апертурой от F1.7 до почти закрытой с 2700 шагами мотора.

Рассмотрим SFDF метод. В отличие от SFF-метода при работе с ними требуется наличие только двух изображений, снятых при различных положениях мотора, что обещает более привлекательные характеристики по быстродействию и объему перерабатываемых данных, несмотря на большую сложность алгоритмов. Эффект размытия изображения за

счет дефокусировки моделируется в [13] гауссовой функцией. Обозначая идеальное изображение через $I_0(x, y)$, функцию размытия $g_\sigma(x, y)$ для расфокусированного изображения можно записать так:

$$I(x, y) = \iint I_0(\xi, \zeta) g_\sigma(x - \xi, y - \zeta) d\xi d\zeta, \\ g_\sigma(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}. \quad (13)$$

Здесь σ определяет размер пятна дефокусировки в плоскости изображения, и зависит от глубины сцены и параметров камеры. Так как методы восстановления формы по дефокусировке получают глубину из двух изображений, а не осуществляют поиск, требуется модель, описывающая связь между размером пятна дефокусировки и глубиной сцены. Принимая во внимание формулу, полученную Пентландом в приближении геометрической оптики, в [13] предлагается ее обобщение:

$$\sigma^2 = \left(k_1(m_z, m_f, m_a) + \frac{k_2(m_z, m_f, m_a)}{D + k_3(m_z, m_f, m_a)} \right)^2 + k_4^2(m_z, m_f, m_a), \quad (14)$$

где D – расстояние от точки сцены до объектива, коэффициенты $k_1 - k_4$ зависят от отсчетов моторов для приближения (зумирование), фокусировки и апертуры. В работе приводится калибровочная процедура, позволяющая построить эти зависимости, и показывается высокая точность аппроксимации, даваемая моделью.

Сначала предположим, что объект представляет собой плоскость, перпендикулярную оптической оси, то есть глубина картины есть константа. Тогда, переходя к Фурье-образам изображения $I \rightarrow F$, и функции размытия $g \rightarrow G$, можно получить следующее:

$$\begin{aligned} \ln \frac{F_1(u, v)}{F_2(u, v)} &= \ln \frac{F_0(u, v) G_{\sigma_1}(u, v)}{F_0(u, v) G_{\sigma_2}(u, v)} = \ln \frac{G_{\sigma_1}(u, v)}{G_{\sigma_2}(u, v)} = \\ &= -\frac{1}{2} (u^2 + v^2) (\sigma_1^2 - \sigma_2^2) - \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \Delta_\sigma. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, исходя из двух изображений, снятых при различных позициях моторов, вычисляется их преобразование Фурье, и ищется методом наименьших квадратов наклон кривой в зависимости от частот $(u^2 + v^2)$. Если объект имеет более сложную форму, то глубину сцены надо вычислять для каждого пикселя изображения, что приводит к необходимости введения пространственного окна для вычисления спектров. В [13] предлагается использовать окно гауссовой формы, которое минимизирует произведение пространственной и частотной неопределенности. В результате задача сводится к расчету разности логарифмов преобразований Габор от двух исходных изображений, а задача аппрок-

симации прямой становится трехмерной.

Касаясь алгоритмов SFS и SFDF, важно упомянуть фактор, суть которого становится понятна из рис. 1, где демонстрируется изменение размеров точечного объекта при расположении плоскости фотоснимка ближе области фокусировки и дальше – d_1, d_2 соответственно. Этот фактор особенно важен для алгоритмов восстановления по дефокусировке, так как он затрудняет сопоставление образов одних и тех же точек объекта на изображениях различной степени дефокусировки, и, более того, существенно зависит от расстояния до точки объекта.

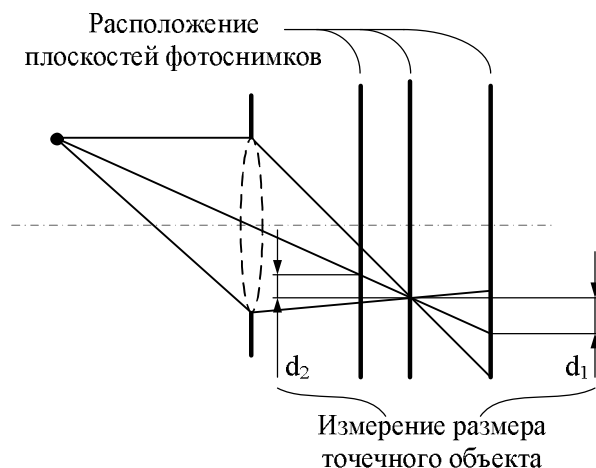


Рис. 1. Смещение изображения точки в зависимости от степени дефокусировки

Для устранения этого мешающего фактора в [15] предложена несложная модификация оптической системы (объектива), заключающаяся во введении дополнительной диафрагмы. Для устранения проблем, связанных с недостатком текстуры, снимаемый объект освещается структурированным освещением (шахматная клетка), причем масштаб этой сетки согласован с размером пикселя фоточувствительных матриц так, что вычисление сверток с гауссовыми функциями удастся заменить оператором Лапласа по окну размера 5×5 . Съемка осуществляется одновременно двумя камерами через один объектив с использованием светоделительной пластины. Таким образом отпадает необходимость в постоянном управлении мотором фокусировки, система один раз перед экспериментом может быть отъюстирована, и работает в реальном масштабе времени. Достоинством метода является работа на минимальных расстояниях, что полезно для проблемы предотвращения столкновений, и в силу одновременного получения и синхронизации обоих снимков, возможность правильного определения формы как неподвижных, так и движущихся объектов.

Алгоритмы 3D модели поверхности из стереопары изображений

По типу обрабатываемых особенностей, алгоритмы восстановления формы сцены на основании стереоизображений делятся на три класса: алгоритмы для геометрических особенностей, основанные на поиске характерных точек (feature-based approaches), алгоритмы для областей (area-based approaches), а также смешанные алгоритмы (miscellaneous approaches).

В методах, основанных на поиске характерных точек, ищутся точки со значительными перепадами яркости на стереопаре. Между найденными на двух изображениях точками устанавливается взаимно однозначное соответствие путем вычисления корреляции фрагментов изображений в окрестности этих точек или, в случае сегментации, путем сравнения интегральных характеристик сегментов. Для точек, в которых взаимно однозначное соответствие установлено, вычисляется расстояние до них методом триангуляции. Расстояние до остальных точек объекта получают посредством интерполяции. Математически, такие алгоритмы принадлежат к широкому классу алгоритмов "Shape from Motion".

Существует несколько смешанных методов, таких как стохастический алгоритм Бернарда. Этот метод плохо работает при недостатке пространственной структуры. Его суть заключается в вычислении карты смещений (disparity) для каждой точки изображения путем минимизации функционала, соответствующего критериям близких интенсивностей и гладкости:

$$E = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (|I_L(i, j) - I_R(i + D(i, j), j)| + \lambda \|\nabla D(i, j)\|), \quad (16)$$

где $I_L(i, j)$, $I_R(i, j)$ – значения пикселей левого и правого изображений;

$D(i, j)$ – карта смещений;

λ – константа;

∇ – оператор вычисляет сумму абсолютных разностей между смещением $D(i, j)$ и его 8 ближайшими соседями.

Задача решается путем численного моделирования Монте-Карло [16].

Большинство алгоритмов группы "Shape from Stereo" находят только грубые детали формы объекта, особенно при недостатке пространственной структуры. В то же время, по сравнению с "Shape from Shading", пространственная локализация крупных деталей, особенно их ребер, и контрастных границ, происходит существенно точнее, а расстояния могут быть восстановлены в абсолютных величинах. Поэтому представляет интерес подход, изложенный в [17], который позволяет объединить эти

два метода. Предложенный метод основан на модели человеческого зрения [18], которое выполняет ту же задачу. Представляя поверхность $Z(x,y)$ в виде Фурье-образа $F_Z(u,v)$, математически этот метод может быть описан так:

$$F_{Z_c}(u,v) = F_{Z_{st}}(u,v)H^{-1}(\omega) + F_{Z_{ss}}(u,v)(1 - H^{-1}(\omega)), \quad (17)$$

$$H(\omega) = \frac{\alpha^2 + \omega^2}{2\alpha\alpha_0 + (1 - \alpha_0)(\alpha^2 + \omega^2)}, \quad (18)$$

$$\omega = \sqrt{u^2 + v^2},$$

где $F_{Z_c}(u,v)$, $F_{Z_{st}}(u,v)$, $F_{Z_{ss}}(u,v)$ – Фурье-образы поверхностей, полученных из стерео, полутонов, и в результате их объединения;

$H(\omega)$ – высокочастотный фильтр из модели, предложенной в [19].

Алгоритмы восстановления 3D модели поверхности из последовательности изображений

В настоящее время, из всех методов реконструкции трехмерных сцен, алгоритмы восстановления сцены по изображениям, полученным с разных положений камеры, и в различные моменты времени, исследуются наиболее интенсивно. При этом часто предполагается, что фокусное расстояние объектива неизвестно или меняется от кадра к кадру. Кроме того не редко положения камеры на момент съемки каждого кадра также полагается неизвестным, и находится в ходе решения задачи реконструкции трехмерной сцены. Как правило, такие методы основываются на поиске характерных точек (feature points) на изображениях, в виде уголков или линий, а также на поиске соответствий между обнаруженными точками на последовательности кадров, нахождении их пространственных позиций по принципу триангуляции, и построении аппроксимирующих поверхностей. Отметим, что указанные методы не работают непосредственно с изображениями, а требуют на вход координаты характеристических точек изображений в пикселях и наличие у каждой характеристической точки маркера (номера), причем, на всей последовательности изображений, одной и той же точке реальной сцены должен соответствовать одинаковый маркер.

Для нахождения характеристических точек существуют различные алгоритмы [20]. Задача нахождения взаимно однозначного соответствия между характеристическими точками на различных изображениях обрабатываемой последовательности, обычно решается методами траекторного анализа и Колмановской фильтрации.

Наиболее перспективными из этой группы являются методы, основанные на факторизации матриц [21 – 24]. В [23] наиболее подробно освещаются основы метода и рассматриваются его детали. В [22] наиболее компактно и подробно описаны различные приближения. В [21] рассматривается применение метода в случае наличия движущихся объектов на сцене, и предлагается подход к определению числа таких объектов и их разделению. В [24] предлагается модификация метода, не требующая предварительного накопления всех данных, но позволяющая уточнять модель по мере поступления новых данных и отличающаяся лучшим быстродействием и меньшими затратами вычислительных ресурсов. Однако, по-видимому, этот метод имеет ограниченное время непрерывной работы из-за переполнения плавающей арифметики и накопления погрешностей, так как на каждом шаге получения новых данных они добавляются к ковариационной матрице измерений, а никаких мер по предотвращению подобной ситуации не предлагается. В статье [23] упоминается подход к применению метода в тех случаях, когда не все характеристические точки видны на всех кадрах.

Сравнительный анализ методов восстановления 3D сцен

Из анализа по теме реконструкции трехмерных сцен и анализу изображений ясно, что для сцен общего вида задача не может быть решена в рамках какого-то одного подхода (алгоритма). В настоящее время разработано огромное количество различных подходов, которые имеют как сильные, так и слабые стороны и ограниченные условия применения. В качестве основного алгоритма восстановления 3D сцен представляется целесообразным выбрать методы класса Shape from Motion, основанные на факторизации матриц. Оправданием такого выбора являются следующие достоинства этой группы методов:

а) относительно невысокие вычислительная сложность и объем перерабатываемой информации при обработке данных, извлеченных из значительного количества кадров;

б) потенциально высокая точность, обусловленная большими базами наблюдений, обеспечиваемыми движением системы зрения в пространстве объектов;

в) согласованная обработка информации, получаемой из большой последовательности кадров;

г) одновременное восстановление информации о движении самой системы зрения, что, в сочетании с данными инерциальных и спутниковых систем (гироскопы, акселерометры, компасы, GPS), дает обратную связь, что позволяет контролировать ра-

зумность получаемых результатов, и открывает возможности автокалибровки;

д) возможности обработки и представления модели сцены с движущимися объектами и их движений.

По существу, методы, основанные на факторизации, позволяют восстановить и отслеживать каркас трехмерной сцены и траекторию движения системы технического зрения в пространстве сцены. Остальные методы восстановления формы могут быть интегрированы с такой моделью двояким образом. С одной стороны, методы, основанные на факторизации матриц, восстанавливают трехмерные координаты только некоторых точек сцены, поэтому возникает задача интерполяции поверхностей сцены между восстановленными точками модели.

Для поверхностей, имеющих текстуру, зависимость текстур от масштаба, расстояния до объекта, степени регулярности текстур, движения объектов сцены и имеющегося в распоряжении времени, могут использоваться методы Shape from Stereo, Shape from defocusing или Shape from Focusing, а также их комбинации. Для поверхностей, не имеющих текстуры, применимы методы типа Shape from Shading. Здесь важно отметить два обстоятельства. Во-первых, применение этих методов к уточнению каркаса, полученного факторизацией, заменяет задачу интерполяции на задачу восстановления истинной формы сцены. Во-вторых, путем интерполяции из модели, полученной факторизацией, может быть выбрано начальное приближение для указанных уточняющих методов, наложены граничные условия, и привлечены дополнительные данные для повышения устойчивости таких методов, например: средняя нормаль к участку поверхности; примерный диапазон, в котором варьируется расстояние от камеры до участка поверхности.

В условиях же аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) наиболее эффективен алгоритм Shape from Motion, способный, накапливая информацию в виде многократно повторяемой съемки одной и той же местности, повышать точность реконструкции модели рельефа. В дальнейшем предстоит обосновать наиболее актуальный метод анализа точности данного метода, чтоб на его основе выявить возможности к минимизации погрешности восстановления цифровой модели.

Литература

1. Horn, B. K. P. *Shape from shading: a method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view* [Text]: Technical report / B. K. P. Horn // Massachusetts Institute of Technology. – Massachusetts, 1970. – 196 p. – MAC-TR-79, Project MAC.

2. *Исследовательские публикации и цифровые архивы Массачусетского технологического университета* [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/30586>.

– 18.11.2005.

3. *Laboratory for Engineering Man-Machine Systems* [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://vision.lems.brown.edu/publications>. – 11.12.1012.

4. Broggi, A. *Real-time oriented system for vehicle detection* [Text] / A. Broggi, M. Bertozzi, S. Castelluccio // *Journal of systems architecture*. – 1997. – № 43. – P. 317 – 325

5. Schonfeldt, U. *Electrical Subsystem of the High Resolution Stereo Camera for Mars Express* [Text] / U. Schonfeldt, J. Krieger, T. Behnke // *UROPEAN SPACE AGENCY PUBLICATIONS ESA SP*. – 2000. – P. 77 – 82.

6. Ikeuchi, K. *Surface reection: physical and geometrical perspectives* [Text] / K. Ikeuchi, S. K. Nayar, T. Kanade // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1991. – Vol. 13. – P. 611 – 634.

7. Pentland, A. *Shape information from shading: a theory about human perception* / A. Pentland // *Proceedings of International Conference on Computer Vision, Nov. 10 – 14, 1988*. – Cambridge, 1988. – P. 404 – 413.

8. *Shape from shading: A survey* [Text] / R. Zhang, P. S. Tsai, J. E. Cryer, M. Shah // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1999. – № 21(8). – P. 690 – 706.

9. *Analysis of shape from shading techniques* [Text] / R. Zhang, P. S. Tsai, J. E. Cryer, M. Shah // *IEEE CVPR*. – 1994. – № 6. – P. 377 – 384.

10. Корниенко, Ю. В. *Задача восстановления рельефа поверхности Марса по изображениям с КА «Марс-94» на основе статистического подхода* [Текст] / Ю. В. Корниенко, Суан Ань Нгуен, В. И. Тернопольский // *Тезисы 14-й Сов.-амер. рабочей встречи по планетологии, 26 – 30 августа 1991 г.* – М., 1991. – С. 39 – 40.

11. Tsai, P. S. *Shape from shading with variable albedo* [Text] / P. S. Tsai, M. Shah // *Optical Engineering*. – 1998. – Vol. 38, № 4. – P. 1212 – 1220.

12. Сивухин, Д. В. *Общий курс физики. Том 4. Оптика* [Текст] / Д. В. Сивухин. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1985. – С. 70 – 74.

13. Xiong, Y. *Depth from focusing and defocusing* [Text] / Y. Xiong, S. Shafer // *Pennsylvania: The robotics Institute Carnegie Mellon University*. – Pittsburgh, 1993. – P. 24.

14. Васильев, Ф. П. *Численные методы решения экстремальных задач: учебник для вузов* [Текст] / Ф. П. Васильев. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1988. – С. 552.

15. Nayar, S. K. *Telecentric optics for constant-magnification imaging* [Электронный ресурс] / S. K. Nayar, M. Watanabe. – Режим доступа: http://www.cs.columbia.edu/CAVE/projects/depth_defocus/depth_defocus.php. – 09.1995.

16. Bernard, S. T. *A stochastic approach to stereo vision [Text]* / S. T. Bernard // *Proc. 5th National Conference AI, April 4, 1986. – 1986. – P. 676 – 680.*
17. Cryer, J. E. *Integration of shape from shading and stereo [Text]* / J. E. Cryer, P. S. Tsai, M. Shah // *Pattern Recognition. – 1995. – № 28(7). – P. 1033 – 1043.*
18. Hall, C. F. *A nonlinear model for the spatial characteristics of the human visual system [Text]* / C. F. Hall, E. L. Hall // *IEEE Trans. System Man Cybern. – 1977. – № 6. – P. 161 – 170.*
19. Takeo, K. *Scene reconstruction from multiple uncalibrated views [Text]* / K. Takeo, M. Han // *The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh. – 01.2000. – 21 p.*
20. Chetverikov, D. A. *Simple and efficient algorithm for detection of high curvature points in planar curves [Text]* / D. A. Chetverikov, S. Zsolt // *23rd Workshop of the Austrian Pattern Recognition Group. – 1999. – P. 175 – 184.*
21. Poelman, C. J. *A paraperspective factorization method for shape and motion recovery [Text]* / C. J. Poelman, T. Kanade // *School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh. – 12.1993. – P. 98 – 109.*
22. Costeria, J. A. *Multi-body factorization method for motion analysis [Text]* / A. J. Costeria, T. Kanade // *School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh. – 09.1994. – P. 1071 – 1076.*
23. Tomasi, C. *Shape and motion from image streams: a factorization method (orthographic method) [Text]* / C. Tomasi, T. Kanade // *School of Computer Science, Carnegie Mellon University, Pittsburgh. – 1992. – P. 137 – 154.*
24. Morita, T. *A sequential factorization method for recovering shape and motion from image streams [Text]* / T. Morita, T. Kanade // *Proceedings of 1994 ARPA Image Understanding Workshop. – 1994. – № 2. – P. 1177 – 1188.*

Поступила в редакцію 16.01.2014, рассмотрена на редколлегии 12.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. приема, передачи и обработки сигналов В. В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕКОНСТРУКЦІЇ 3D МОДЕЛЕЙ ПОВЕРХНІ ПО ЗОБРАЖЕННЯМ ДЛЯ НАВІГАЦІЇ РУХЛИВИХ ОБ'ЄКТІВ

I. A. Gergel

Подано докладний огляд актуальних методів комп'ютерного зору, що застосовуються для реконструкції 3D моделей поверхні по серії зображень з метою виявлення основних достоїнств і недоліків. Проведено аналіз методів з метою виявлення особливостей досліджуваних поверхонь, для реконструкції яких кожен з методів дасть найкращий результат. На основі проведеного огляду обрано найбільш відповідний задачам реконструкції моделі поверхні в умовах зйомки рельєфу місцевості з борту безпілотного літального апарату алгоритм для реалізації та оцінки точності.

Ключові слова: оптична система, Ламбертовська модель, стереопара, Фур'є-образ, глибина різкості, фоточутлива матриця, метод триангуляції, факторизація матриці.

ANALYSIS OF THE METHODS FOR RECONSTRUCTION 3D SURFACE MODELS PICTURE FOR NAVIGATION MOVING OBJECTS

I. A. Gergel

A detailed overview of current computer vision methods is given. It's used for 3D surface models reconstruction from a series of images to identify the main advantages and disadvantages. The analysis of the methods to identify the features of the surfaces under investigation for which each reconstruction the methods give the best results are performed. Based on the review of the most relevant tasks surface model reconstruction under shooting a terrain on board an unmanned aerial vehicle algorithm for implementing and evaluating accuracy has been selected.

Key words: optical system, Lambertian model, stereo pair, Fourier image, depth of field, the photosensitive matrix, triangulation method, the matrix factorization.

Гергель Игорь Андреевич – аспирант каф. производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: igor.ok1@inbox.ru.