Алгоритм определения положения линейного объекта в трехмерном пространстве по данным стереонаблюдений в оптическом диапазоне длин волн

А. А. Козирацкий, email: akoziratskiy@gmail.com [1]
В. Д. Попело, email: popelovd@gmail.com [1]
Д. К. Проскурин, email: pdk@vgasu.vrn.ru [2]
П. Е. Кулешов, email: pekulesh@yandex.ru [3]

[1] Воронежский государственный университет
[2] Воронежский государственный технический университет
[3] ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Аннотация. *Предложен алгоритм определения положения в пространстве линейного объекта, использующий результаты фотограмметрической обработки пары цифровых видеоизображений, полученных средствами наблюдения с идентичными техническими характеристиками. Сформулирован принцип таких измерений. Определены границы применения алгоритма, обусловленные дискретным характером используемых изображений.*

Ключевые слова: *линейный объект, пространственное положение, стереоскопическое наблюдение, фотограмметрическая обработка, цифровое изображение.*

Введение

Активные и пассивные средства дистанционного наблюдения обеспечивают обнаружение и определение параметров объектов путем регистрации собственного и рассеянного излучения этих объектов, например, оптического. В зависимости от соотношений между размерами вдоль ортогональных осей трехмерной пространственной системы координат объекта (q_x, q_y, q_z) и элемента разрешения средства наблюдения (l_x, l_y, l_z) все цели наблюдения могут быть отнесены к одному из четырех классов объектов:

«нуль-мерных» ($0\mathrm{d}$, точечных), если $q_x < l_x$, $q_y < l_y$, $q_z < l_z$;

одномерных ($1\mathrm{d}$, линейных), среди которых выделяют две группы: одномерных объектов «поперечного» расположения, когда, $q_y < l_y$,

---

$q_z < l_z$ или $q_x < l_x$, $q_y < l_y$, $q_z > l_z$, и одномерных объектов «продольного» расположения, когда $q_x < l_x$, $q_y > l_y$, $q_z < l_z$;

двумерных ($2\mathrm{d}$), среди которых также выделяют две группы: двумерных объектов «поперечного» расположения (площадных), если $q_x > l_x$, $q_y < l_y$, $q_z > l_z$ и двумерных объектов «продольного» расположения, если $q_x > l_x$, $q_y > l_y$, $q_z < l_z$ или $q_x < l_x$, $q_y > l_y$, $q_z > l_z$;

трехмерных ($3\mathrm{d}$, объемных), если $q_x > l_x$, $q_y > l_y$, $q_z > l_z$.

При пассивном характере наблюдения с использованием неподвижного единственного пространственно-одноканального средства существует возможность дистанционного определения лишь плановых размеров объекта (q_x, q_z), но отсутствует возможность оценивания его «глубины» (q_y). Эта возможность появляется при осуществлении стереоскопических наблюдений с применением подвижных или пространственно-многоканальных средств. В настоящее время разработано большое число алгоритмов совместной фотограмметрической обработки данных стереоскопических наблюдений трехмерных объектов [1-3], но практически отсутствуют модификации таких алгоритмов, предназначенные для определения ориентации в пространстве двумерных и одномерных объектов. Вместе с тем, в последнее время особую практическую важность приобрела задача определения пространственного положения линейных объектов таких, например, как линий электропередач, в интересах осуществления навигации аппаратов пилотируемой и беспилотной авиации на малых высотах в пределах городских территорий и мест локализации техногенных объектов. Большой интерес представляет также определение положения лазерных пучков, создаваемых средствами оптической связи и локации, обладающих прямолинейными траекториями, и наблюдаемых с боковых направлений вследствие рассеяния их излучения на неоднородностях атмосферы.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма определения положения в пространстве линейного объекта по результатам фотограмметрической обработки пары цифровых видеоизображений, полученных из пространственно-разнесенных точек средствами наблюдения с идентичными техническими характеристиками.

1. Основные допущения

1. Наблюдение осуществляют пассивным методом, регистрируя рассеянное несамосветящимся линейным объектом естественное излучение или рассеянное в атмосфере излучение лазерного пучка. При этом анализируют проективные изображения, создаваемые идентичными цифровыми (матричными) средствами видеонаблюдения (датчиками).

2. Для формализации геометрических отношений в задаче использована прямоугольная правая система координат $SXYZ$ с началом в точке S центра проекции первого датчика. Центр проекции S расположен в плоскости объектива средства наблюдения (датчика) на его оптической оси. Ось SX системы координат лежит в горизонтальной плоскости, ось SZ – в вертикальной, а ось SY направлена от центра проекции S к исследуемому объему пространства вдоль оптической оси средства наблюдения.

3. Второй датчик, идентичный по своим техническим характеристикам первому, смещен в пространстве на расстояние B, которое называют базис стереоизмерений. С центром проекции S' второго датчика также связана система координат $S'X'Y'Z'$ такая, что координаты произвольной точки в системах координат $SXYZ$ и $S'X'Y'Z'$ соотносятся как $x = x' + B$, $y = y'$, $z = z'$.

4. Каждый датчик представляет собой пространственно-многоканальное средство проективного наблюдения, объектив которого имеет неизменные и известные значения фокусного расстояния f и диаметра D апертуры. Поглощение в оптической системе отсутствует.

5. Фотоприемное устройство каждого датчика, размещено вблизи фокальной плоскости объектива, имеет линейные размеры $w_n \times w_m$ (обычно $w_n \ll f$, $w_m \ll f$) и обеспечивает формирование растрового изображения с количеством элементов $n \times m$. Размеры элемента ФПУ $w_n / n \sim w_m / m$ превышают размеры кружка рассеяния ϖ объектива. Все элементы ФПУ идентичны по чувствительности η, работают на линейном участке рабочей характеристики.

6. Телесное угловое поле средства наблюдения – $\Omega = w_n w_m f^{-2}$. Угловые поперечные (в плоскостях SXY и SYZ) размеры его элемента разрешения определяются соотношениями $\theta_x = w_n / nf$, $\theta_z = w_m / mf$ соответственно.

7. Произвольная точка A линейного объекта отображается в плоскости ФПУ-1 (первого датчика) и ФПУ-2 (второго датчика), с которыми связаны две двумерные системы координат a_0, x, z и a'_0, x', z', где a_0, a'_0 – главные точки проективных изображений, создаваемых объективами первого и второго датчика. В хорошо отъюстированных оптических системах главные точки – это точки пересечении плоскости изображения оптической осью объектива, то есть $a_{0x} = a_{0z} = a'_{0x} = a'_{0z} = 0$. Поэтому координаты изображения точки A, создаваемые каждым датчиком, отсчитываемые от положения главной точки имеют значения a_x, a_z и a'_x, a'_z соответственно.

Исходные геометрические соотношения, иллюстрирующие допущения, принятые для решения задачи, представлены на рисунке 1. Для обеспечения совпадения направлений координатных осей систем $SXYZ$ и a_0, x, z, а также $S'X'Y'Z'$ и a'_0, x', z', плоскости ФПУ-1 и ФПУ-2 повернуты относительно центров проектирования S и S' на угол 180°.

2. Принцип определения трехмерных координат точек линейного объекта

Рассмотрим связь плановых координат точки $A(X_A, Y_A, Z_A)$ со значениями плановых координат a_x, a_z и a'_x, a'_z ее проективных изображений, созданных ФПУ-1 и ФПУ-2 соответственно. Обратим внимание (рисунок 1), что координаты $a_z = a'_z$, вследствие того, что проектирующие лучи AS и AS' лежат в одной плоскости, являясь сторонами треугольника ASS'. Следовательно, совпадают номера строк матриц, которые содержат отклики на рассеянное излучение, приходящее из точки A линейного объекта. Соответственно другие точки линейного объекта отображаются в других строках ФПУ-1 и ФПУ-2. Таким образом, проблема выбора «соответственных точек» на изображениях, создаваемых каждым из средств наблюдения для линейного объекта (в отличие от трехмерного [1-3]), решается автоматически, если отсутствуют сдвиг S' относительно S по координате Z и повороты осей $S'Z'$ относительно SZ и $S'Y'$ относительно SY.

Принцип определения трехмерных координат произвольной точки A линейного объекта иллюстрирует рисунок 2. Для упрощения графических построений на рисунке 2 рассмотрена конфигурация проектирующих лучений в плоскости SXY и совпадающей с ней плоскости $S'X'Y'$.

Рассмотрим вначале возможность определения продольной координаты точки $A - X_A$. Из схемы, приведенной на рисунке 2, следует:

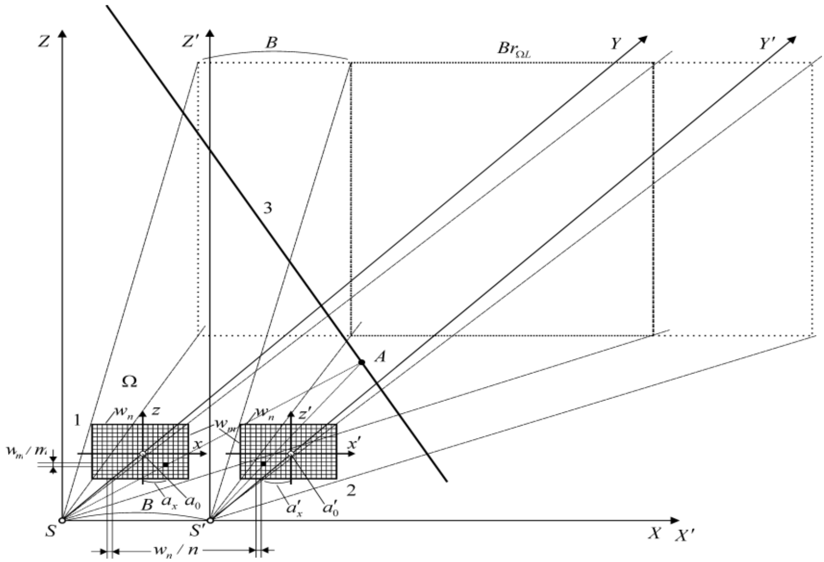

Рис. 1. Геометрические соотношения в задаче определения пространственного положения пучка лазерного излучения по данным стереоизмерений: 1, 2 – матрицы ФПУ двух каналов датчика; 3 – траектория пучка лазерного излучения в пространстве; A – точка на траектории пучка лазерного излучения

$$Y_A = \frac{f\,B}{p_a}, \tag{1}$$

где $p_a = a_x - a'_x$ – параллакс точки A на изображениях, формируемых ФПУ-1 и ФПУ-2 (на рисунке 2 значение $a'_x < 0$).

Следует отметить, что формула (1) отражает алгоритм определения продольной координаты точки вне зависимости от ее высоты относительно плоскости SXY.

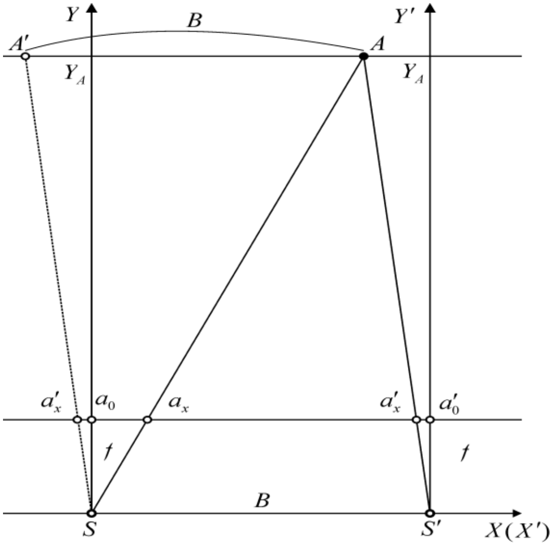

Рис. 2. Схема определения координат X_A и Y_A точки A по плановым координатам изображений a_x и a'_x, измеренным в ФПУ-1 и ФПУ-2

После вычисления значения продольной координаты Y_A алгоритм определения поперечной координаты X_A имеет простую структуру, которую отражает следующая формула:

$$X_A = \frac{Y_A a_x}{f} = \frac{Ba_x}{p_a} \tag{2}$$

Аналогично (2) определяют координату Z_A:

$$Z_A = \frac{Y_A a_z}{f} = \frac{Ba_z}{p_a}. \tag{3}$$

Для определения ориентации линейного объекта в пространстве достаточно знать трехмерные координаты двух несовпадающих точек этого объекта, то есть определить плановые координаты его изображения в двух различных строках матриц, расположенных в плоскостях ФПУ-1 и ФПУ-2 и рассчитать соответствующие параллаксы.

Абсолютное значение удаления линейного объекта вычисляют по формуле (1).

Для более детального формализованного описания пространственного положения линейного объекта свяжем с ним вектор, ориентированный от его наиболее удаленной точки к наиболее близкой. Тогда в соответствие с известными соотношениями аналитической геометрии (см., например, [4]) координаты этого вектора в системе $SXYZ$ могут быть выражены через трехмерные координаты начала и конца вектора как:

$$X_L = X_{L1} - X_{Lm} = B\left(\frac{a_{x1}}{p_1} - \frac{a_{xm}}{p_m}\right); \quad (4)$$

$$Y_L = Y_{L1} - Y_{Lm} = fB\left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_m}\right); \quad (5)$$

$$Z_L = Z_{L1} - Z_{Lm} = B\left(\frac{a_{z1}}{p_1} - \frac{a_{zm}}{p_m}\right), \quad (6)$$

где X_L, Y_L, Z_L – координаты вектора, связанного с линейным объектом; X_{Lm}, Y_{Lm}, Z_{Lm} – координаты начала этого вектора; X_{L1}, Y_{L1}, Z_{L1} – координаты конца вектора, связанного с линейным объектом.

Формулы (4) - (6) соответствуют случаю $p_1 > p_m$.

Протяженность L линейного объекта определяет выражение:

$$L = B\sqrt{\left(\frac{a_{x1}}{p_1} - \frac{a_{xm}}{p_m}\right)^2 + \left(\frac{f}{p_1} - \frac{f}{p_m}\right)^2 + \left(\frac{a_{z1}}{p_1} - \frac{a_{zm}}{p_m}\right)^2}. \quad (7)$$

Наклон линейного объекта относительно координатных осей системы $SXYZ$ (направляющие косинусы) определяют выражения:

$$\cos\alpha = \frac{\left(\frac{a_{x1}}{p_1} - \frac{a_{xm}}{p_m}\right)}{\sqrt{\left(\frac{a_{x1}}{p_1} - \frac{a_{xm}}{p_m}\right)^2 + \left(\frac{f}{p_1} - \frac{f}{p_m}\right)^2 + \left(\frac{a_{z1}}{p_1} - \frac{a_{zm}}{p_m}\right)^2}}; \quad (8)$$

$$\cos\beta = \frac{f\left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_m}\right)}{\sqrt{\left(\frac{a_{x1}}{p_1} - \frac{a_{xm}}{p_m}\right)^2 + \left(\frac{f}{p_1} - \frac{f}{p_m}\right)^2 + \left(\frac{a_{z1}}{p_1} - \frac{a_{zm}}{p_m}\right)^2}}; \quad (9)$$

$$\cos\gamma = \frac{\left(\frac{a_{z1}}{p_1} - \frac{a_{zm}}{p_m}\right)}{\sqrt{\left(\frac{a_{x1}}{p_1} - \frac{a_{xm}}{p_m}\right)^2 + \left(\frac{f}{p_1} - \frac{f}{p_m}\right)^2 + \left(\frac{a_{z1}}{p_1} - \frac{a_{zm}}{p_m}\right)^2}}, \qquad (10)$$

где α, β, γ – углы, образуемые вектором (связанным с линейным объектом) с координатными осями SX, SY и SZ.

Соотношения (4) - (10) отражают существо алгоритма определения положения в пространстве линейного объекта по результатам фотограмметрической обработки пары цифровых видеоизображений, полученных из разнесенных на величину базиса стереоизмерений точек средствами наблюдения с идентичными техническими характеристиками.

3. Границы применения алгоритма, обусловленные дискретным характером изображений

Полученные выше соотношения (4) - (10), не учитывают дискретный характер изображений, формируемых матричными приемниками ФПУ-1 и ФПУ-2. Необходимость учета этого фактора накладывает ряд ограничений на область применимости разработанного алгоритма.

Минимальное расстояние $Y_{\min}$ соответствует ближней границе пространственной области перекрытия угловых полей датчиков

$$X_A = \frac{Y_A a_x}{f} = \frac{Ba_x}{p_a} \qquad (11)$$

Это же значение Y_{min} может быть получено из условия достижения максимального значения параллакса p_{max}, которое не может превысить геометрических размеров каждой из матриц ФПУ-1 и ФПУ-2.

Максимальное расстояние Y_{max}, определяющее потенциальные возможности определения дальности до линейного объекта, определяется минимально возможным значением параллакса p_{min}, которое не может быть меньше ширины одного элемента матрицы ФПУ, то есть:

$$p_{min} = \frac{w_n}{n}. \qquad (12)$$

Тогда:

$$Y_{max} = \frac{nf\ B}{w_n}. \qquad (13)$$

Исходя из требований к значениям Y_{min} и Y_{max}, можно подобрать соответствующие значения величин $B,\ f,\ w_n,\ n$, то есть базиса стереоизмерений, фокусного расстояния объективов датчика, размеров матрицы ФПУ и числа чувствительных элементов матрицы.

Ограничения, связанные с точностью определения координат точек линейного объекта. При условии точного знания значений $B,\ f$, относительная среднеквадратическая погрешность стереоизмерений дальности равна относительной среднеквадратической погрешности измерения параллакса. Если считать, что среднеквадратическая погрешность определения параллакса σ_p определяется, в основном, погрешностью дискретизации изображения, создаваемого матрицей, то:

$$\frac{\sigma_p}{p} \approx \frac{0{,}4\ w_n}{np}. \qquad (14)$$

Для параллакса $p_{min} = \frac{w_n}{n}$ значение относительной среднеквадратической погрешности измерений дальности составит:

$$\frac{\sigma_{Y\ max}}{Y_{min}} \approx 0{,}4\ . \qquad (15)$$

Для малых дальностей погрешность измерений существенно уменьшается и для Y_{min} и составит:

$$\frac{\sigma_{Y\ max}}{Y_{min}} \approx 0{,}4\ n^{-1}. \qquad (16)$$

Список литературы

1. Лобанов А.Н. Фотограмметрия/А.Н.Лобанов – М.: Недра, 1984. – 552 с.
2. Назаров А.С. Фотограмметрия/ А.С. Назаров – Мн: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
3. Da Silva D.C. Special Applications of Photogrammetry/ D.C. Da Silva – Intech, 2012. – 136 с.
4. Умнов А.Е. Аналитическая геометрия и линейная алгебра/ А.Е. Умнов – М.: МФТИ, 2010. – 570 с.