Минимизация метрических искажений снимков стереопары в процессе ректификации

Minimization of stereo pair images metric distortion during rectification process

Хрущ / Khrusch R.
Роман Михайлович
(Chrusch@rambler.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА им. А. Ф. Можайского),
профессор кафедры фототопографии и фотограмметрии.
г. Санкт-Петербург

Гринь / Grin A.
Александр Николаевич
(al-grin1@yandex.ru)
кандидат физико-математических наук, доцент.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
профессор кафедры математики.
г. Санкт-Петербург

Соловьёв / Solovieov A.
Алексей Владимирович
(solov19882008@mail.ru)
кандидат технических наук.
ВКА им. А. Ф. Можайского,
старший научный сотрудник
453 лаборатории ВИ (НИ).
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: ректификация – rectification; идеальная стереопара – ideal stereo pair; элементы ориентирования стереопары – elements of stereo pair orientation; фундаментальная матрица – fundamental matrix.

В статье предложен способ уменьшения геометрических искажений при ректификации стереопары с произвольными элементами ориентирования. Предложенный способ позволяет не только минимизировать искажения, но и выполнить их количественную оценку. Экспериментальная проверка предложенного способа показала возможность существенно повысить точность обработки.

The method for reducing geometric distortions during rectification of stereo pair with arbitrary orientation elements has been proposed in the article. Based on the proposed method it is possible not only to minimize the distortions, but also to perform their quantitative ratings. Experimental validation of the proposed method proved that it is possible to improve processing accuracy significantly.

В статье предлагается способ уменьшения геометрических искажений цифровых снимков стереопары при их преобразовании. Перед изложением основного содержания напомним отдельные определения и понятия, которые относятся к стереопаре снимков. Такая необходимость, как нам представляется, вызвана следующими обстоятельствами. В переводных работах англоязычных источников встречаются определения и названия некоторых элементов стереопары снимков (рис. 1), которые отличаются от принятых в нашей фотограмметрической литературе, например в [1–3]. Подобные названия и понятия, к сожалению, появляются и в работах отечественных авторов, что может вносить путаницу и непонимание, особенно, если пользователями являются специалисты с непрофильным образованием.

Одним из центральных процессов фотограмметрической обработки перекрывающихся снимков является отождествление (идентификация) одноименных (соответственных) точек стереопары. При этом важное место отводится площадным способам корреляции, сущность которых состоит в анализе и сравнении окрестностей одноименных точек снимков стереопары. Очевидно, что в этом случае приходится выполнять множество вычислительных операций, так как необходимо анализировать всю площадь перекрытия снимков стереопары. Это важно особенно при автоматической обработке снимков, так как влияет на скорость и оперативность обработки [4].

Существенно ускорить процесс отождествления одноименных точек возможно, если их обнаруживать на базисных линиях (рис. 1). Здесь показано, что одноименные точки m_1 и m_2 находятся на одноименных базисных (эпиполярных) линиях m_1k_1 и m_2k_2 (все

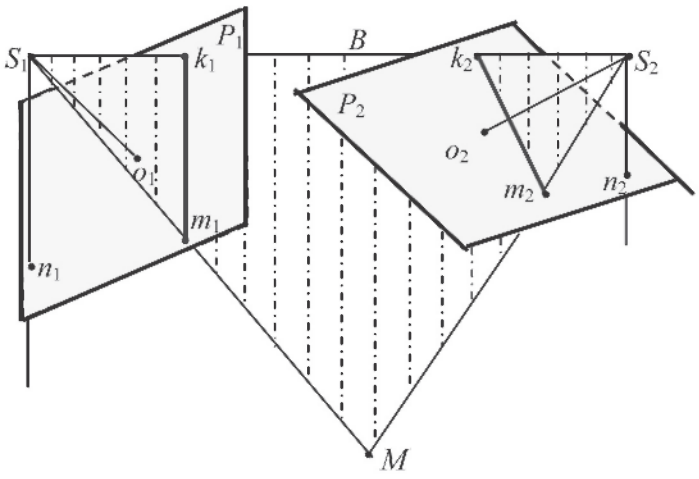

Рис. 1. Элементы стереопары

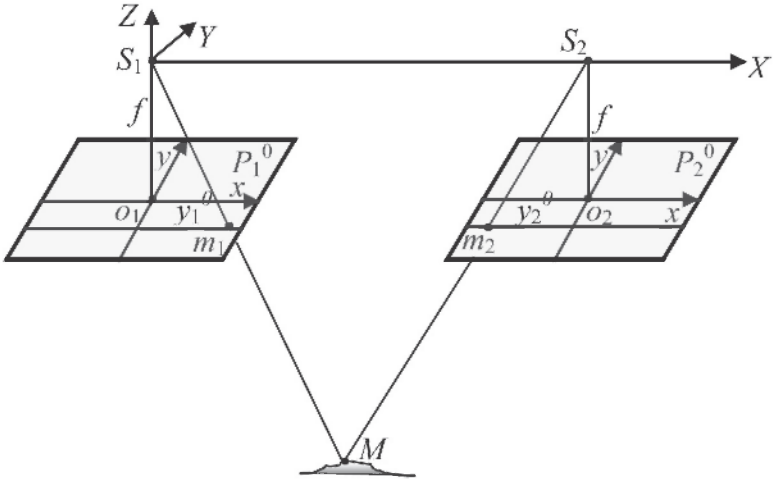

Рис. 2. Идеальная стереопара снимков

базисные линии сходятся в базисных точках (эпиполюсах) k_1 и k_2). Поэтому, если определить одноименные базисные линии, поиск соответственных точек значительно облегчается.

Дальше встает вопрос об определении базисных линий. Проще всего базисные линии можно определить по идеальной стереопаре снимков (рис. 2).

На снимках идеальной стереопары, как известно, снимки преобразуются в условно горизонтальные, а их оси абсцисс становятся параллельными базису фотографирования. При этом базисные линии параллельны осям абсцисс и отстоят от них на равных расстояниях ($y^0_1 = y^0_2$). В результате поперечные параллаксы одноименных точек отсутствуют. Преобразование снимков общего случая в идеальную стереопару является тривиальной задачей, если известны элементы их взаимного ориентирования.

Однако важно определить базисные линии без выполнения взаимного ориентирования снимков. Такая задача решается с применением теоретических положений компьютерного зрения, где решение осуществляется с использованием уравнения взаимного ориентирования, выраженного через фундаментальную или существенную матрицу, а сам процесс называют ректификацией. Ректификация (название пришло из англоязычных текстов), в отечественных публикациях называется иногда и «выравниванием снимков» (название, дезориентирующее даже специалистов). Ректификация означает преобразование снимков в идеальную стереопару. На идеальной стереопаре, что очевидно, базисные линии определяются просто. Поэтому имеется возможность осуществлять поиск одноименных точек вдоль базисных линий, другими словам свести двумерный поиск к одномерному.

Известные алгоритмы ректификации приводят к метрическим искажениям изображений, что при работе с цифровыми изображениями вызывает уничтожение пикселов изображений или появление новых пикселов. Это обстоятельство нарушает взаимно-однозначное соответствие пикселов изображений цифровых снимков стереопары при их преобразовании и увеличивает погрешность последующего отождествления точек снимков. Поэтому возникает задача построения идеальной стереопары снимков с минимальными метрическими искажениями. В теории компьютерного зрения аналогичная задача решается путём минимизации функционала, определяемого сингулярными числами якобиана преобразования [5–7]. Цель такого решения – повышение геометрического качества изображения. Количественная оценка степени метрической деформации изображения при этом не производится, что важно для точности фотограмметрической обработки, в том числе – повышения точности отождествления одноименных точек стереопары.

Наш подход для решения поставленной задачи основан на минимизации метрической деформации изображений и ее количественной оценки. Пусть имеем одноименные точки стереопары снимков, выраженные в однородных координатах $\boldsymbol{m} = (u, v, -1)^T$, $\boldsymbol{m}' = (u', v', -1)$. Фундаментальная матрица стереопары есть

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix}.$$

Фундаментальная матрица ректифицированной (идеальной) стереопары снимков всегда имеет вид

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для одноимённых точек стереопары выполняется условие: $(\boldsymbol{m}')^T F \boldsymbol{m} = 0$, а потому, если H', H – матрицы преобразования, приводящего к ректификации изображений, то:

$$(H')^t \times \tilde{F} \times H = F; \qquad (1)$$

$$(m')^T \times (H')^{-} \times \tilde{F} \times H \times m = 0.$$

При этом $H \cdot m$, $H' \cdot m'$ являются изображениями одноимённых точек на ректифицированных (трансформированных) снимках. Для того чтобы преобразования H, H' осуществляли ректификацию изображений, необходимо, чтобы их структура, согласно [5], имела вид:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ h_{21} & 1 & 0 \\ h_{31} & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ h'_{21} & h'_{22} & h'_{23} \\ h'_{31} & h'_{32} & h'_{33} \end{bmatrix}.$$

Значения элементов этих матриц получаются из уравнения (1), которое, после перемножения матриц, примет вид

$$\begin{bmatrix} h'_{31} h_{21} & -h'_{21} h_{31} & h'_{31} - h'_{21} \\ h'_{32} h_{21} & -h'_{22} h_{31} & h'_{32} - h'_{22} \\ h'_{33} h_{21} & -h'_{23} h_{31} & h'_{33} - h'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix}. \qquad (2)$$

Найденные преобразования не являются единственными, осуществляющими ректификацию. Если взять

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A' = \begin{bmatrix} \alpha'_{11} & \alpha'_{12} & \alpha'_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

то, поскольку $\tilde{F} A - \tilde{F}$ и $(A')^T \tilde{F} = \tilde{F}$, получим

$$(A'H')^T \tilde{F}(AH) = (H')^T (A')^T \tilde{F} AH = (H')^T \tilde{F} H = F.$$

Таким образом, преобразования AH, $A'H'$ также ректифицируют стереопару при любых значениях элементов матриц A, A'. Определим матрицы A, A' так, чтобы преобразования AH, $A'H'$ минимизировали нарушение взаимно-однозначного соответствия пикселов изображений до и после ректификации. Поскольку пиксел – двумерная структура, то появление или исчезновение пикселов в результате преобразований связано с изменением площади преобразованного снимка по отношению к исходному. Поэтому мерой метрического искажения будем рассматривать меру изменения площади треугольника с вершинами

$$m_1=(u,v,-1)^T, m_2=(u+\Delta_1,v,-1)^T,$$
$$m_3=(u,v+\Delta_2,-1),$$

где Δ_1, Δ_2 – приращения координат.

До ректификации площадь такого треугольника равна $S_1=\frac{1}{2}\Delta_1\times\Delta_2$.

После ректификации:

$$S_2=\frac{1}{2}\left|A\times H\times(m_2-m_1)\times A\times H\times(m_3-m_1)\right|,$$

то есть

$$S_2=\frac{1}{2}\left|A\times H\times(\Delta_1,0,0)^T\times A\times H\times(0,\Delta_2,0)^T\right|.$$

Подставляя в выражение S_2 матрицы A, H, получим

$$S_2=\frac{1}{2}\sqrt{h_{31}^2+h_{21}^2\times a_{12}^2+(a_{11}+a_{13}\times h_{31})^2}\times\Delta_1\times\Delta_2, \quad (2)$$

Выберем элементы матрицы A так, чтобы величина отклонения площади треугольника с данными вершинами после ректификации от площади до ректификации была минимальной, то есть

$$d=\frac{1}{4}\left(\sqrt{h_{31}^2+h_{21}^2\times a_{12}^2+(a_{11}+a_{13}\times h_{31})^2}-1\right)^2\times\Delta_1^2\times\Delta_2^2$$

должна быть минимальной.

Решение системы, определяющей условия минимума d:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial d}{\partial a_{11}}=0;\\ \dfrac{\partial d}{\partial a_{12}}=0;\\ \dfrac{\partial d}{\partial a_{13}}=0;\end{cases} \quad (3)$$

даёт следующие результаты:

– если $|h_{31}|<1$, $h_{21}\neq 0$, то $a_{11}+a_{13}\times h_{31}=0$, $a_{12}=\dfrac{\sqrt{1-h_{31}^2}}{h_{21}}$;

– если $|h_{31}|<1$, $h_{21}=0$, то $a_{11}-\sqrt{1-h_{31}^2}-a_{13}\times h_{31}$;

– если $|h_{31}|>1$, то $a_{12}=0$, $a_{11}=-a_{13}\times h_{31}$.

Проиллюстрируем полученные результаты на конкретной стереопаре снимков. Используя восьми точечный метод, была получена фундаментальная матрица стереопары:

$$F=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ -0{,}11696 & 49{,}23315 & 1\\ -1{,}40334 & -1{,}00293 & 49{,}20322\end{bmatrix},$$

которая, на основании уравнения (1'), позволила найти матрицу H:

$$H=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ -1.796\times10^{-3} & 1 & 0\\ -0.79 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

Поскольку

$$|h_{31}|<1,\ h_{21}\neq 0,\ \text{то}\ a_{11}+a_{13}\times h_{31}=0,\ a_{12}=\frac{\sqrt{1-h_{31}^2}}{h_{21}}.$$

Относительное изменение площади при этом составляет:

$$\delta_1=\frac{|S_2-S_1|}{S_1},\ \delta_1=0.$$

Если процедуру минимизации не использовать, то значение площади S_2 составит

$$S_2'=\frac{1}{2}\left|H\times(m_2-m_1)\times H\times(m_3-m_1)\right|,$$
$$S_2'=\frac{1}{2}\sqrt{h_{31}^2+1}\times\Delta_1\times\Delta_2,$$

что приведёт к относительному изменению площади $\delta_2=0{,}274$.

Процедура минимизации на 27% уменьшила степень метрических искажений. Таким образом, предложенный способ позволяет не только уменьшить геометрические искажения цифровых снимков стереопары при их преобразовании в идеальную стереопару, но и оценить величину таких искажений, что итоге позволит повысить точность конечных результатов.

Литература

1. Лобанов, А. Н., Фотограмметрия / А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.

2. Хрущ, Р. М., Фотограмметрия / Р.М. Хрущ. – СПб.: изд. ВКА, 2011. – 541 с.

3. Михайлов, А. П. Фотограмметрия А.Г. / А.П. Михайлов, А.Г. Чибуничев. – М.: МИИГАиК, 2016. – 294 с.

4. Райченко, Б. В. Практическое применение методов ключевых точек на примере сопоставления снимков со спутника «Канопус-В» / Б.В. Райченко, В.В. Некрасов // Геоматика. – 2013. – № 2. – С. 52–58.

5. Ayache, N. Artificial Vision for Mobile Robots: Stereo Vision and Multisensory Perception: chapter 3 / N. Ayache. – The MIT Press, 1991. – 284 p.

6. Mallonь, J. Projective Rectification from the Fundamental Matrix / J. Mallon, P. Whelan. – Dublin City University, 2005. – 148 p.

7. Соловьев, А. В. Метод автоматического определения одноименных точек для вычисления элементов взаимного ориентирования снимков / А.В. Соловьев // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 1. – С. 40–44.