УДК 004.932

В.А. Саблина, К.А. Беляева

ОТСЛЕЖИВАНИЕ ТОЧЕК ЛАЗЕРНОГО ПОДСВЕТА НА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ КАЛИБРОВОЧНОГО ОБЪЕКТА

Представлен обзор современных подходов к отслеживанию точек на последовательности изображений. Предложен алгоритм обнаружения точек лазерного подсвета. Продемонстрированы результаты работы предложенного алгоритма на тестовых изображениях калибровочного объекта. Проведено сравнение и показана целесообразность выбора определенных алгоритмов для реализации извлечения дескрипторов признаков и их сопоставления в рассматриваемом случае.

Ключевые слова: *детекторы точек интереса, дескрипторы признаков, сопоставление изображений, калибровочный объект, техническое зрение.*

Введение. Техническое зрение – одна из наиболее перспективных и быстро развивающихся областей научного знания, которая находит применение при разработке различных систем реального времени, в робототехнике, а также при моделировании рельефа местности [1]. В последнем случае информация для построения трехмерной модели местности может поступать от одной или нескольких камер, осуществляющих аэрофотосъемку [2, 3]. Однако такой исходной информации в некоторых случаях может быть недостаточно для вычисления расстояний до объектов местности. Тогда в дополнение к системе камер целесообразно использование лазерного подсвета для получения опорных точек. Для точного вычисления расстояний до этих точек система камер и лазерный подсвет должны быть предварительно совместно откалиброваны. Это позволит уточнить геометрическое расположение лучей лазера в пространстве относительно системы камер.

В настоящей статье рассматривается технология отслеживания положения точек лазерного подсвета, спроецированных на плоскость калибровочного объекта. Эта технология может использоваться на начальном этапе настройки системы для последующего построения трехмерной модели местности.

Цель работы – исследовать методы, позволяющие реализовать технологию отслеживания точек лазерного подсвета на последовательности изображений калибровочного объекта, разработать недостающие алгоритмы, провести эксперименты на тестовых изображениях калибровочного объекта.

Отслеживание точек на последовательности изображений. Для отслеживания изменений положения точек на последовательности изображений необходимо попарно сопоставлять соседние изображения из этой последовательности. В общем случае можно выделить четыре следующих шага в процессе сопоставления изображений [4, 5].

1. Обнаружение точек интереса.
2. Извлечение дескрипторов признаков для этих точек интереса.
3. Сопоставление дескрипторов для нахождения предполагаемых соответствий.
4. Исключение ложных соответствий и вычисление геометрического преобразования между изображениями.

В рассматриваемом случае этот процесс имеет особенности, поскольку в качестве точек интереса выступают точки лазерного подсвета. В связи с этим поставленную задачу не удалось решить, применяя только известные классические алгоритмы. Для реализации этапа обнаружения точек лазерного подсвета был разработан специальный алгоритм, поэтому далее этому этапу уделяется наибольшее внимание.

Обнаружение точек интереса на изображениях. Точки интереса, называемые также особыми или характерными точками, обладают окрестностями, существенным образом отличающими их от основной массы остальных точек на изображении [6]. Количество таких точек намного меньше, чем общее количество точек на изображении, и они рассматриваются в качестве локальных признаков изображения.

Существуют различные типы локальных

признаков, например, углы, пятна и края [7]. Для их обнаружения используют детекторы. Детекторы могут обеспечивать инвариантность к различным преобразованиям: к вращению и сдвигу, к масштабированию, к аффинным и проективным преобразованиям. В настоящее время методы построения детекторов признаков исследованы достаточно глубоко, и имеется ряд обзоров для различных типов детекторов [6, 8, 9].

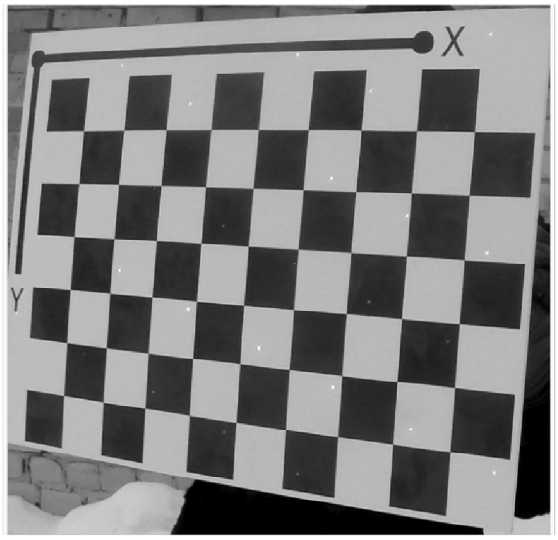
Известно, что хорошие локальные признаки должны обладать следующими свойствами [6]: повторяемость, отличительность или информативность, локальность, численность, точность, эффективность. Повторяемость может быть достигнута или за счет инвариантности, или за счет устойчивости. Наиболее известными являются детекторы Ши-Томаси, Моравеца, Харриса, Кэнни, DoG, SURF, SUSAN, FAST, MSER, детектор на основе матрицы Гессе. В таблице 1 отмечены особенности некоторых из этих детекторов признаков [6].

Таблица 1– Сравнение детекторов признаков

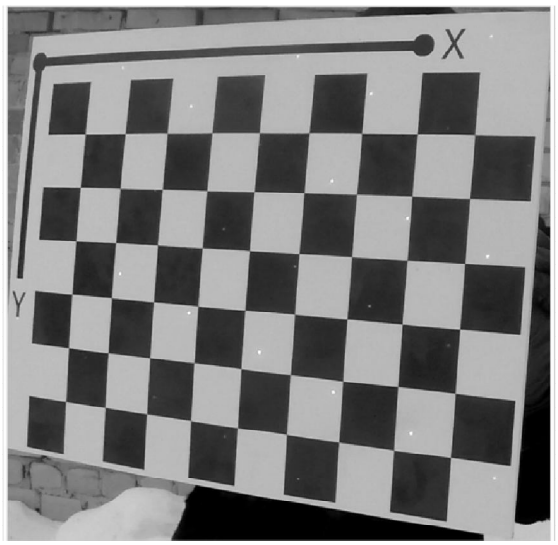
Детекторы	Харриса	Гессе	SUSAN	SURF
Угол	√		√	√
Пятно		√		√
Вращение	√	√	√	√
Масштаб				√
Повторяемость	+++	++	++	++
Точность	+++	++	++	++
Устойчивость	+++	++	++	++
Эффективность	++	+	+++	+++

После проведенного обзора существующих детекторов оказалось, что ни один из классических детекторов не подходит для обнаружения точек лазерного подсвета, поскольку точки лазерного подсвета по существу составляют отдельный тип локальных признаков. Поэтому было принято решение разработать свой собственный алгоритм для обнаружения точек лазерного подсвета.

Алгоритм обнаружения точек лазерного подсвета. Пример пары тестовых изображений калибровочного объекта для проведения экспериментальных исследований представлен на рисунке 1. Можно заметить, что точка лазерного подсвета может занимать не один пиксель изображения, а некоторую небольшую область. Поэтому целесообразно под точкой лазерного подсвета подразумевать совокупность пикселей, расположенных в центре окрестности этой точки. Основной особенностью точек лазерного подсвета, по которой их можно обнаруживать, является существенное отличие яркости точки лазерного подсвета в светлую сторону по сравнению с окружающей ее окрестностью. При этом абсолютные значения яркостей точек лазерного подсвета могут варьироваться в зависимости от фона. Принцип работы алгоритма обнаружения точек лазерного подсвета заключается в использовании указанной особенности. Для каждого пикселя изображения среднее значение яркости непосредственно прилегающей к нему небольшой окрестности сравнивается со средним значением яркости окружающего фона. Если они существенно различаются, пиксель предположительно считается принадлежащим точке лазерного подсвета.



а



б

Рисунок 1 – Тестовые изображения:
а – первое изображение; б – второе изображение

Лишние точки, ложно отнесенные к точкам лазерного подсвета, впоследствии отбрасываются. Таким образом, обнаружение точек лазерного подсвета достигается за счет использования специального фильтра с масками вида

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{\omega}' = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

при выборе размеров $K \times K$ анализируемой окрестности, равными 9×9. Маски накладываются на текущую анализируемую окрестность (n, m)-го пикселя $\mathbf{f}_{n,m}$. Края изображения при этом не учитываются. Вычисляется значение критерия для отнесения пикселя к точке лазерного подсвета по формуле

$$l_{n,m} = \frac{8 \sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{K} \omega(i,j) f_{n,m}(i,j)}{\sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{K} \omega'(i,j) f_{n,m}(i,j)}, \quad (2)$$

где $\omega(i,j)$ – (i,j)-й элемент матрицы $\boldsymbol{\omega}$, $\omega'(i,j)$ – (i,j)-й элемент матрицы $\boldsymbol{\omega}'$, $f_{n,m}(i,j)$ – (i,j)-й элемент матрицы $\mathbf{f}_{n,m}$.

Если $l_{n,m} < T$, где T – некоторый выбранный порог, то (n,m)-й пиксель предварительно считается принадлежащим точке лазерного подсвета, иначе – нет.

Таким образом, предлагаемый алгоритм обнаружения точек лазерного подсвета состоит из следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Выбор исходного фрагмента изображения, содержащего точки лазерного подсвета, для исследования.

Шаг 2. Выбор размеров окрестности $K \times K$. В результате экспериментальных исследований хорошие результаты были получены при размерах окрестности 9×9.

Шаг 3. Анализ каждого пикселя изображения, кроме пикселей, близких к краю изображения, на предмет принадлежности к точкам лазерного подсвета в соответствии с формулами (1) и (2).

Шаг 4. Выбор порогового значения T. Было установлено, что значения, близкие к 1,2, дают хорошие результаты.

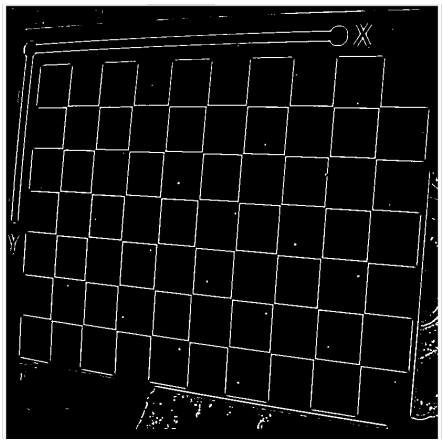
Шаг 5. Формирование бинарного изображения, на котором белые пиксели соответствуют пикселям, предположительно принадлежащим точкам лазерного подсвета, а черные пиксели – все оставшиеся.

Шаг 6. Выбор пороговой длины границы L для отбрасывания лишних точек. В экспериментах использовалось значение, равное 20. Получение множества связных объектов по бинарному изображению. Отбрасывание объектов с превышением заданной длины границы L.

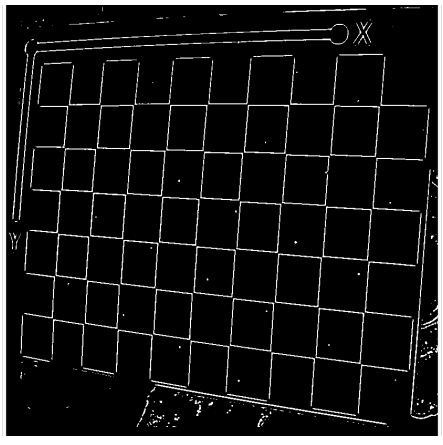
Шаг 7. Получение координат центров точек лазерного подсвета на изображении.

Разработка алгоритма и все экспериментальные исследования были выполнены в среде MATLAB®.

Бинарные изображения, полученные для тестовых изображений на рисунках 1,а и 1,б с использованием указанных параметров алгоритма, представлены на рисунках 2,а и 2,б соответственно.



а



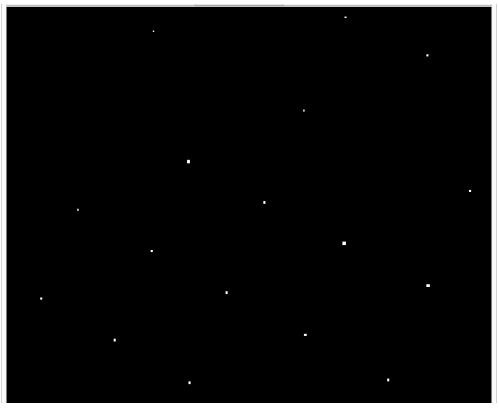
б

Рисунок 2 – Бинарные изображения: а – первое изображение; б – второе изображение

Можно видеть, что на предварительном этапе обнаруживается довольно много ложных пикселей, не принадлежащих на самом деле точкам лазерного подсвета. Однако в ходе дальнейшей обработки их достаточно легко устранить. Это можно сделать с помощью стандартной функции среды MATLAB *bwboundaries()*. Данная функция возвращает длины всех связных объектов бинарного изображения. Лишние объекты удаляются по результатам сравнения этих длин с выбранным пороговым значением L. Это значение выбиралось эмпирически. После отбрасывания этих лишних объектов на бинарном изображении остаются только представляющие интерес точки лазерного подсвета. Полученные фрагменты бинарных изображений с обрезанными краями, демонстрирующие найденные точки лазерного подсвета, представлены на рисунке 3. Рисунок 3,а представляет собой результат обработки первого тестового изображения с рисунка 1,а, а рисунок 3,б – второго тестового изображения с рисунка 1,б.



а



б

Рисунок 3 – Найденные точки лазерного подсвета: а – для первого изображения; б – для второго изображения

Далее необходимо определить координаты центров точек лазерного подсвета для их дальнейшего описания и сопоставления. Это легко сделать с помощью стандартной функции MATLAB *regionprops()*. Полученные координаты центров точек лазерного подсвета для тестовых изображений калибровочного объекта на рисунках 1,а и 1,б представлены в таблицах 2 и 3 соответственно.

Координаты центров точек лазерного подсвета могут иметь дробные значения, поскольку обнаруженные точки лазерного подсвета состоят из нескольких пикселей. Полученные координаты центров точек лазерного подсвета являются результатом работы предлагаемого алгоритма.

Таблица 2 – Координаты центров точек лазерного подсвета для первого тестового изображения

X	*Y*
49.0000	417.5000
101.5000	291.0000
153.5000	477.0000
155.5000	164.5000
207.0000	349.5000
209.5000	35.5000
260.0000	222.0000
261.5000	538.0000
314.0000	409.5000
368.0000	279.5000
425.0000	148.5000
426.5000	470.5000
…	…

Таблица 3 – Координаты центров точек лазерного подсвета для второго тестового изображения

X	*Y*
50.0000	418.0000
102.5000	291.0000
155.0000	477.5000
208.0000	350.0000
210.5000	35.5000
260.5000	222.0000
262.0000	538.5000
315.0000	409.5000
369.0000	280.5000
425.5000	149.0000
427.5000	470.0000
483.0000	339.0000
…	…

Описание обнаруженных точек лазерного подсвета. После обнаружения процесс дальнейшей обработки точек лазерного подсвета практически ничем не отличается от процесса обработки других типов точек интереса, поэтому может производиться стандартными методами. Для описания точек лазерного подсвета можно воспользоваться одним из известных алгоритмов построения дескрипторов признаков.

Входными данными для дескриптора признаков является изображение и набор обнаруженных точек интереса, а выходными данными – множество векторов признаков, построенных для этих точек. Одними из самых известных дескрипторов для описания локальных признаков изображений являются дескрипторы SIFT, SURF, HOG, GLOH, FREAK и BRISK [6].

В среде MATLAB реализованы следующие дескрипторы: SURF, BRISK, FREAK, Block. После ряда экспериментов было принято решение использовать простой дескриптор Block, так как он дал наилучшие результаты. После того как были получены дескрипторы точек для каждого изображения, их необходимо сопоставить.

Сопоставление дескрипторов точек лазерного подсвета. Процесс сопоставления позволяет установить соответствия между признаками на изображениях с использованием извлеченных дескрипторов признаков. Конкретный алгоритм сопоставления выбирается в зависимости от типа извлеченных дескрипторов [10]. Обычно используется какая-либо мера расстояния: сумма абсолютных расстояний (SAD), сумма квадратов расстояний (SSD), нормализованная кросс-корреляция (NCC) [11], сумма расстояний Хэмминга (SHD) или расстояние хи-квадрат [12]. Выбранная пара позволяет определить, насколько похожи вектора признаков. Пары признаков, имеющие наименьшее расстояние, рассматриваются в качестве предполагаемых соответствий.

Простейшим способом, который можно использовать для установления соответствий между признаками, является полный перебор. Полный перебор удобно использовать при небольшом количестве извлеченных признаков. Так как на тестовых изображениях имеется сравнительно небольшое количество точек лазерного подсвета, было решено использовать для их сопоставления полный перебор на основе меры расстояния SSD. Эта мера является наиболее подходящей, исходя из размеров векторов признаков, и вычисляется по формуле

$$SSD_{r,s} = \sum_{q=1}^{Q} (u_r(q) - v_s(q))^2, \qquad (3)$$

где $u_r(q)$ – q-й элемент вектора признаков $\mathbf{u}_r$, $v_s(q)$ – q-й элемент вектора признаков $\mathbf{v}_s$, Q – длина вектора признаков; $\mathbf{u}_r$ – r-й вектор признаков из множества извлеченных из первого изображения векторов признаков $\{\mathbf{u}_r \mid r = 1, 2, ..., R\}$, R – количество векторов признаков первого изображения; $\mathbf{v}_s$ – s-й вектор признаков из множества извлеченных из второго изображения векторов признаков $\{\mathbf{v}_s \mid s = 1, 2, ..., S\}$, S – количество векторов признаков второго изображения.

Полученные результаты сопоставления полным перебором дескрипторов точек лазерного подсвета на основе меры расстояния SSD представлены в таблице 4. В таблице отражено соответствие номеров точек лазерного подсвета на первом и втором изображениях.

Если среди установленных соответствий между точками лазерного подсвета на паре изображений имеются ложные, их легко можно исключить с помощью одной из версий алгоритма RANSAC [13, 14, 15], основанной на нахождении параметров матрицы гомографии, определяющей геометрическое проективное преобразование между плоскостями калибровочного объекта на паре изображений. Тем самым одновременно можно вычислить искомое геометрическое преобразование [16].

Таблица 4 – Результаты сопоставления точек на первом и втором изображениях

Номер точки на первом изображении	Номер точки на втором изображении
5	4
6	5
7	6
9	8
10	9
13	12
14	13
18	17

Результаты сопоставления точек лазерного подсвета для тестовой пары изображений на рисунке 1 наглядно представлены на рисунке 4. Для отображения сопоставленных пар точек использовалась стандартная функция MATLAB *showMatchedFeatures()*. Соответствия между точками показаны линиями.

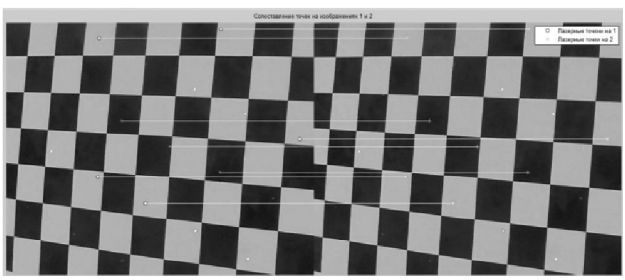


Рисунок 4 – Результаты сопоставления точек для пары тестовых изображений

Для отслеживания положения точек лазерного подсвета на последовательности изображе-

ний калибровочного объекта необходимо попарно сопоставлять предыдущее и последующее изображения последовательности, а затем прослеживать изменение положений точек лазерного подсвета.

Заключение. В статье предложен алгоритм обнаружения точек лазерного подсвета на изображении калибровочного объекта в рамках реализации технологии отслеживания этих точек. Полученные результаты могут быть использованы для калибровки системы камер, дополнительно оборудованной лазерным подсветом.

Библиографический список

1. *D.A. Forsyth, J. Ponce*, Computers Vision: A Modern Approach. New York: Prentice-Hall, 2011. P. 792.

2. *R.C. Gonzalez, R.E. Woods,* Digital Image Processing, Prentice Hall, 2008. P. 954.

3. *T. Kanade, H. Kano, and S. Kimura*, "Development of a video-rate stereo machine," in Image Understanding Workshop, Monterey, CA, 1994. P. 549-557.

4. *Alpaslan F., Apolloni B., Ghosh A., Jain L.C., and Patnaik S.* Machine Learning and Robot Perception. Springer, 2005.

5. *A. Hast, V.A. Sablina, G. Kylberg, and I.-M. Sintorn,* A Simple and Efficient Feature Descriptor for Fast Matching, 23rd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG) Full Papers Proceedings. University of West Bohemia, Plzen, Czech Republic, 2015. P. 135-142.

6. *Tuytelaars, T and Mikolajczyk, K.* Local invariant feature detectors: A survey. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 3, 2008.

7. *Victoria A. Sablina, Anatoly I. Novikov, Michael B. Nikiforov, and Alexander A. Loginov,* An Approach to the Image Superimposition Problem in Multispectral Computer Vision Systems, 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, 2013. P.117-120.

8. *Schmid C., Mohr R., and Bauckhage C.*, Evaluation of interest point detectors. Int. J. Comput. Vision 37, 2 (June 2000). P. 151-172.

9. *Zuliani M., Kenney C., and Manjunath B. S.,* A mathematical comparison of point detectors. In Second IEEE Image and Video Registration Workshop (IVR) (Jun 2004). P. 172-178.

10. *Muja M., Lowe D.*, Fast matching of binary features. In Computer and Robot Vision (CRV), 2012 Ninth Conference on (May 2012). P. 404-410.

11. *Nakhmani A., Tannenbaum A.,* A new distance measure based on generalized image normalized crosscorrelation for robust video tracking and image recognition. Pattern Recogn. Lett. 34, 3 (Feb. 2013). P. 315-321.

12. *Hast A.*, Robust and invariant phase based local feature matching. In Proceedings of the 22nd International Conference of Pattern Recognition (ICPR) (2014), Poster with Paper. P. 809–814.

13. *Fischler M. A., Bolles R. C.*, Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM 24, 6 (June 1981). P 381-395.

14. *A. Hast, J. Nysjö, and A. Marchetti,* "Optimal RANSAC – Towards a Repeatable Algorithm for Finding the Optimal Set," in Journal of WSCG, Vol. 21, no. 1. P. 21-30, 2013.

15. *Anatoly I. Novikov, Victoria A. Sablina, and Aleksey I. Efimov*, Image Superimposition and the Problem of Selecting the Set of Corresponding Point Pairs, 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) Proceedings. Budva, Montenegro, 2015. P. 139-142.

16. *Hartley R. I., Zisserman A.,* Multiple View Geometry in Computer Vision, second ed. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, 2003. P. 673.