

УДК 621.375.132

В. М. Зуев, М. В. Близно

Государственное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк
83048, г. Донецк, ул. Артема, 118-б

АЛГОРИТМ КАЛИБРОВКИ СТЕРЕОКАМЕРЫ

V. M. Zuev, M. V. Blizno

Public institution «Institute of Problems of Artificial intelligence», Donetsk
83048, Donetsk, Artema st., 118-b

STEREO CAMERA CALIBRATION ALGORITHM

В. М. Зуев, М. В. Близно

Державна установа «Інститут проблем штучного інтелекту», м. Донецьк
83048 м. Донецьк, вул. Артема, 118-б

АЛГОРИМ КАЛІБРУВАННЯ СТЕРЕОКАМЕРИ

В статье представлен упрощенный алгоритм калибровки стереокамеры, основанный на статическом сравнении тестовых изображений от правой и левой камер, с возможностью его реализации в микроконтроллерах или ПЛИС. Приведен расчет временных затрат на реализацию алгоритма на ПЛИС.

Ключевые слова: стереокамера, стереопара, калибровка, микроконтроллер, ПЛИС.

The article presents a simplified algorithm for stereo camera calibration based on static comparison of test images from the right and left cameras, with the possibility of its implementation in microcontrollers or FPGAs. The calculation of time spent on the implementation of the algorithm on the FPGA is given.

Key words: stereo camera, stereo pair, calibration, microcontroller, FPGA.

У статті представлений спрощений алгоритм калібрування стереокамери, оснований на статичному порівнянні тестових зображень від правої та лівої камер, з можливістю його реалізації на мікроконтролерах або ПЛІС. Приведено розрахунок часових витрат на реалізацію алгоритму на ПЛІС.

Ключові слова: стереокамера, стереопара, калібрування, мікроконтролер, ПЛІС.

Введение

Актуальность работы. Стереозрение находит все большее применение в промышленных роботах. Так как стереопара может быть изготовлена с некоторой геометрической погрешностью, то всегда возникает необходимость её юстировки. Известны способы юстировки, основанные на статическом сравнении тестового изображения от правой и левой камер. В то же время необходимо откалибровать (или убедиться в правильности калибровки) в процессе работы, когда наблюдение тестового изображения по какой-либо причине невозможно.

В статье представлен и описан разработанный авторами алгоритм такой калибровки стереокамеры. Алгоритм ориентирован не на достижение предельно возможной точности, а на простоту его реализации в микроконтроллерах или ПЛИС и получения малого времени калибровки при точности, достаточной для практических применений.

Цель работы – реализация алгоритма калибровки стереокамеры, разработанного на микроконтроллерах или ПЛИС, основанного на статическом сравнении тестовых изображений от правой и левой камер. Описанный в статье алгоритм ориентирован не на достижение предельно возможной точности, а на простоту его реализации в микроконтроллерах или ПЛИС и получения малого времени калибровки при точности, достаточной для практических применений.

Содержание работы

Стереозрение наиболее часто применяется тогда, когда требуется определить геометрическое положение тел в пространстве. При этом погрешность в определении положения тел вносит:

- горизонтальный сдвиг кадров правого и левого каналов на величину, отличную от истинного значения стереобазы;
- вертикальный сдвиг кадров правого и левого каналов на величину, отличную от нуля;
- несоосность камер;
- поворот камер в фокальной плоскости;
- неравенство фокусных расстояний;
- различие в оптических aberrациях камер.

Некоторые погрешности могут быть устранены при применении одной камеры для правого и левого канала, что достигается или механическим перемещением камеры, или соединением светового потока левого и правого каналов в один с помощью призм. Здесь мы рассматриваем случай применения двух камер.

Широко известным способом калибровки является вычисление многомерной функции корреляции $F(x, y, \theta, \phi, f)$ между правым и левым каналом.

Здесь: x – расхождение по горизонтали;

y – расхождение по вертикали;

θ – несоосность;

ϕ – поворот камер;

f – различие в фокальных расстояниях.

Нахождение такой многомерной функции корреляции является не простой вычислительной задачей с большим затратами времени. Если считать (что не всегда

оправдано) независимость по параметрам, то можно представить ее как произведение отдельных корреляционных функций:

(1)

Но даже вычисление такой функции является трудоемким процессом для многих микроконтроллеров.

Поэтому нами предлагается следующий упрощенный способ.

Пусть L и R – матрица пикселей левого и правого изображения какого-либо одинакового цвета.

1. Для каждой строки i (для определенности пусть) левого изображения вычисляем сумму:

(2)

2. Находим минимальный элемент $s(k)$ из всех строк.

На рис. 1 зависимость $s(k)$ по формуле (2) для изображения со стереокамеры, что представляет собой сдвиг R относительно L .

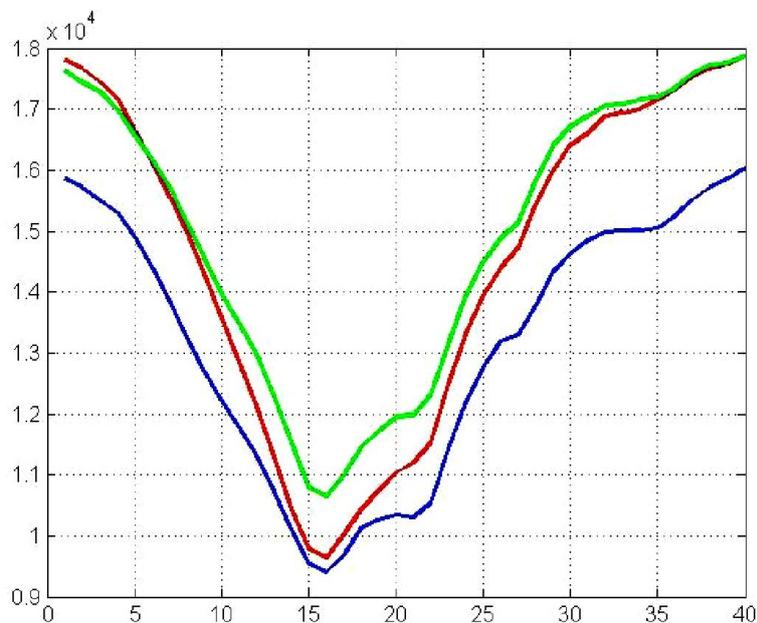


Рисунок 1 – Зависимость $s(k)$ по формуле (2) для изображения со стереокамеры

Если получилось, что $s(k)$ минимален при $k > 0$, то значит эти k столбцов надо выбросить из изображений. После этого размер x будет совмещен.

Конечно, такая ситуация имеет место быть, если все остальные искажения малы по сравнению с тем, которая имеет место быть по x . На практике именно этот случай наиболее вероятен.

Затем повторяем эти же вычисления, но уже для каждого столбца. Обычно находят минимум не (2), а аналогичной квадратичной нормы, но минимум при этом получается менее четким, а вычисления более затратны.

В отличие от вычислений корреляционных функций, где при размере матрицы $M \times N$ придется вычислить минимум $2MN$ произведений, тут обходимся в $M \times N \times k$ сложений. Теоретически k может достигать M , но на практике $k < 0.1M$. Таким

образом, имеем около $0.1M^2N$ сложений. Более того, учитывая, что соседние строки довольно сильно коррелированы, не имеет смысла сразу вычислять (2) для всех строк. Оптимально вычислить, прореживая строки в 5 – 10 раз и только в области минимума вычислять для каждой строки.

Следует заметить, что, хоть и редко, но на практике бывают случаи, когда имеется несколько минимумов, равных или незначительно отличающихся. В этом случае нужно брать тот минимум, для которого значение производной максимально:

$$\left| \frac{\partial}{\partial k} s(i, k) \right| = \max \quad (3)$$

После калибровки по горизонтали приступаем к калибровке по вертикали.

3. Для каждого столбца j (для определенности пусть) левого изображения вычисляем сумму

$$p(j, k) = \sum_{i=1}^{l-k} |u_l(i, j) - u_r(i + k, j)| \quad (4)$$

4. Находим минимальный элемент $p(j_{min}, k_{min})$ из всех столбцов.

Если получилось, что $k_{min} > 0$, то значит эти k_{min} сток надо выбросить из изображений. После этого размер u будет совмещен.

Конечно, такая ситуация имеет место быть, если все остальные искажения малы по сравнению с той, которая имеет место быть по u . На практике именно этот случай наиболее вероятен.

Если изображение цветное, то за k_{min} берется величина, соответствующая цвету с минимальным значением $s(i_{min}, k_{min})$

Все замечания, которые были сказаны выше для строк, справедливы и для столбцов.

Следующим этапом проводим компенсацию возможного поворота фокальной плоскости. Для этого необходимо провести реорганизацию всех точек изображения по формуле

$$u(i_n, j_n) = Gu(i, j). \quad (5)$$

где индекс n относится к новым повернутым, координатам, а матрица G поворота дается формулой:

$$G = \begin{vmatrix} \sin\phi & \cos\phi \\ -\cos\phi & \sin\phi \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Из (3, 4) нетрудно получить формулу расчета цвета пикселей в новой позиции. Мало того, что расчет тригонометрических функций для разных углов ϕ не удобен, так часто еще надо применять постфильтрацию таким образом повернутого изображения [1], [2].

На практике часто изображение повернуто незначительно, как правило, всего на 1 – 3 пикселя по горизонту, то предлагается провести предварительное тестирование следующим образом.

Строка с найденным $s(i_{min}, k_{min})$ поворачивается в положительном и отрицательном направлении на величину, порядка углового размера пикселя и затем для этой повернутой строке вычисляется величина $s(i_n, k_n)$.

Если для какого-либо поворота получается выигрыш, то есть $s(i_n, k_n) < s(i_{min}, k_{min})$, то тогда вычисляется поворот в этом направлении, в противном случае считается, что коррекции в повороте нет необходимости.

Более того, этот пробный поворот заменяем сдвигом, а именно, все пиксели точек, лежащих правее k_{min} , заменяем на пиксели, являющиеся комбинацией текущей и лежащие в нижней строке при повороте в положительном направлении или на пиксели, или лежащие в верхней строке при повороте в отрицательном направлении:

$$u(i_n, j_n) = u(i, j) \left(1 - \frac{i - k_{min}}{w - k_{min}}\right) + u(i, j \pm 1) \frac{i - k_{min}}{w - k_{min}} \quad (7)$$

При этом поворот, по сути, заменяется на деформацию кадра в виде параллелограмма, что при малом повороте вполне допустимо, так как возникающие при этом относительные линейные искажения равны $M/(M+1)$ и при большом M будут незначительны.

Реализация алгоритма такова.

Пусть параметры изображения $M \times N = 640 \times 480$ пикселей RGB, частота кадров $F_k = 25$ кадров в секунду. Длительность кадра $T_k = 1/25 = 40$ мс, длительность строки $T_s = \frac{T_k}{N} = 83$ мкс

Длительность пикселя $T_p = \frac{T_s}{M} = 122$ нс. Если принять $k=30$, то на каждое вычисление будет необходимо $122/30=4$ нс. То есть алгоритм реализуем на ПЛИС и на калибровку потребуется всего один кадр.

Выводы

В результате работы был предоставлен алгоритм калибровки стереокамеры, основанный на статическом сравнении тестовых изображений от правой и левой камер. Исходя из временных затрат обработки изображений в представленном алгоритме делается вывод что данный алгоритм реализуем на ПЛИС. Целесообразность такой реализации обоснована тем, что на калибровку потребуется всего один кадр.

Список литературы

1. Пустовойтов А. Н. Прецизионный поворот растрового изображения на произвольный угол [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/160401/>
2. Бородин В. А. Быстрый метод поворота изображения сложного символа, выводимого на экран геоинформационных комплексов реального времени [Текст] / В. А. Бородин // Математичні машини і системи. – 2004. – № 2. – С. 55–60.
3. Зуев В. М. Интеллектуальный подход использования пеленгации со сверхразрешением в самонаводящихся системах [Текст] / В. М. Зуев, М. В. Близно, С. И. Уланов, В. В. Гавриленко // Проблемы искусственного интеллекта. – 2019. – № 4 (15). – С. 15–25.

References

1. Pustovoitov A. N. *Pretsizionnyy povorot rastrovogo izobrazheniya na proizvol'nyy ugol* [Precision rotation of a raster image at an arbitrary angle]. Mode of access: <https://habr.com/ru/post/160401/>
2. Borodin V. A. *Bystryy metod povorota izobrazheniya slozhnogo simvola, vyvodimogo na ekran geoinformatsionnykh kompleksov real'nogo vremeni* [Fast method of turning the image of a complex symbol displayed on the screen of real-time geoinformation complexes]. *Matematichni mashini i sistemi* [Mathematical machine systems], 2004, No. 2, pages 55-60.

3. Zuev V. M., Blizno M. V., Ulanov S. I., Gavrilenko V. V. *Intellectual'nyy podkhod ispol'zovaniya pelengatsii so sverkhrazresheniye v samonavodyashchikhsya sistemakh* [Intellectual approach of using determination with super-resolution in homing systems]. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of Artificial Intelligence], 2019, No 4 (15), S. 15–25.

RESUME

V. M. Zuev, M. V. Blizno

Algorithm for stereo camera calibration

The relevance of the work is due to the fact that stereo vision is increasingly used in industrial robots. Since a stereo pair can be made with some geometric error, there is always a problem with its alignment. There are known alignment methods based on static comparison of the test image from the right and left cameras. At the same time, it is often necessary to calibrate (or make sure that the calibration is correct) during operation, when it is impossible to observe the test image for any reason.

The aim of the work was to implement a stereo camera calibration algorithm implemented on microcontrollers or FPGAs based on static comparison of test images from the right and left cameras. The algorithm described in the article is not focused on achieving the maximum possible accuracy, but on the simplicity of its implementation in microcontrollers or FPGAs and obtaining a short calibration time with an accuracy sufficient for practical applications.

Based on the presented calculations, the algorithm is fully implemented on the FPGA and only one frame is required for calibration.

РЕЗЮМЕ

В. М. Зувев, М. В. Близно

Алгоритм калибровки стереокамеры

Актуальность работы обусловлена тем, что стереозрение находит все большее применение в промышленных роботах. Так как стереопара может быть изготовлена с некоторой геометрической погрешностью, то всегда возникает проблема её юстировки. Известны способы юстировки, основанные на статическом сравнении тестового изображения от правой и левой камер. В тоже время часто необходимо откалибровать (или убедиться в правильности калибровки) в процессе работе, когда наблюдение тестового изображения по какой-либо причине невозможно.

Цель работы была в реализации алгоритма калибровки стереокамеры, реализуемого на микроконтроллерах или ПЛИС, основанного на статическом сравнении тестовых изображений от правой и левой камер. Описанный в статье алгоритм, ориентирован не на достижение предельно возможной точности, а на простоту его реализации в микроконтроллерах или ПЛИС и получения малого времени калибровки при точности, достаточной для практических применений.

Исходя из представленных расчетов алгоритм вполне реализуем на ПЛИС и на калибровку потребуются всего один кадр.

Статья поступила в редакцию 28.07.2020.