

Сравнение качества построения карты глубины при использовании различных калибровочных моделей сверхширокоугольных объективов

Пантелеев М.

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого
panteleev.md@edu.spbstu.ru

Аннотация

1 Введение

Применения не ограничивается роботами, переписать.

За последние годы был достигнут существенный прогресс в доступности и точности сенсоров, позволяющих мобильным роботам проводить оценку окружающего пространства. Такие информационно-измерительные устройства как лидары, сонары и стереокамеры стали основным источником информации для алгоритмов автономной навигации и локализации. Тем не менее в роботах по-прежнему присутствуют телевизионные системы, так как они дают наиболее легко воспринимаемую информацию для оператора в случаях, когда его вмешательство необходимо. "Обычные" камеры, описываемые перспективной проекцией, дают изображение, понятное для восприятия и обработки, но покрывают зачастую слишком маленькую область пространства. Однако такие изображения в меньшей степени пригодны для применения в алгоритмах автономной навигации и локализации в виду того, что видят те или иные особенности окружающего пространства в среднем более короткие промежутки времени [?].

Для достижения большего поля зрения могут быть использованы катадиоптрические системы, состоящие из выгнутого зеркала и перспективной камеры. Однако такой метод не всегда применим, так как система получается громоздкой и имеет "мёртвую зону" посередине кадра. Наконец, можно использовать камеры "рыбий глаз" (англ. fisheye-camera), позволяющие с помощью специальной системы линз одним кадром покрыть угловое поле свыше 180° . В сравнении с катадиоптрическими они обладают большей полезной областью кадра.

SAMPLE

Рис. 1: Сравнение изображений с разных типов камер

При этом, как видно по изображению 1 (в), сверхширокоугольные объективы накладывают на изображение заметные искажения. Обычно принято рассматривать два вида искажений: тангенциальные и радиальные, но в данном случае тангенциальные пренебрежимы по сравнению с радиальными и далее рассматриваться не будут. Устранение этих искажений является важной задачей, так как её решение позволяет нивелировать недостатки сверхширокоугольных объективов и применять их для чувствительных к точности передачи формы объектов в кадре задач.

Одной из таких задач является стереозрение. Несмотря на существование методов, позволяющих оценивать глубину по полным fisheye-сняткам [?], классические методы, требующие ректификации, всё ещё остаются самыми доступными и производительными. Построив систему стереозрения на основе ортогонально расположенных сверхширокоугольных камер, можно получить ряд преимуществ перед традиционными камерами. Для этого сначала нужно выбрать модель искажений, наиболее точно описывающую данные линзы. [здесь бы сослаться на самого себя, но пока не на что, и тогда, получается, что принцип этой системы тоже надо бы описать].

Оптическая система была смоделирована в виртуальной среде с применением игрового движка Unity и плагина ZybrVR Dome Tools.

1.1 Модели камер "рыбий глаз"

Сверхширокоугольные линзы изготавливают, закладывая разные виды проекций, их примеры приведены на рисунке ??, но реальные линзы не всегда в точности соответствуют им, поэтому для более точного описания принято использовать модели дисторсии на основе других функций. Определим основные обозначения. Модель проекции для камеры это функция (обычно обозначаемая $\pi_c(\cdot)$), которая моделирует преобразование из точки трёхмерного пространства ($P = [x_c, y_c, z_c]^T$) в поле зрения камеры в точку на плоскости изображения ($p = [u, \nu]^T$). Тогда обратная проекция - это ... Единичная полусфера S с центром в точке O_c описывает поле зрения. На ней также лежит точка P_C , являющаяся результатом обратной проекции $\pi_c^{-1}(p)$. Угол θ является углом падения для рассматриваемой точки, а угол ϕ откладывается между положительным направлением оси u и $O_i p$.

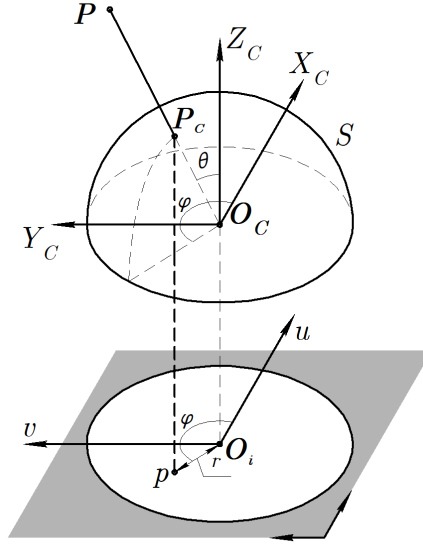



Рис. 2: Схема проекции точки трёхмерного пространства в точку на изображении

Основными критериями выбора моделей были: пригодность для моделирования сверхширокоугольных линз, простота калибровки и распространённость. Существует несколько программных пакетов, позволяющих автоматически калибровать камеры. Это *kalibr* (модели Канналы, Радтан, фов), *OdoCamCalib* (модели Мея и Канналы), *OpenCV* (модели Канналы и) и *MATLAB* (модель Скарамуззы). Таким образом, далее будут рассмотрены основные модели камер, отобранные для сравнения.

КВ Модель Канналы и Брандта [?] реализована в частности *OpenCV* и описывает радиальные искажения через угол падения луча света на линзу, а не расстояние от центра изображения до места падения, как это делалось в более ранних моделях. Авторы посчитали, что для описания типичных искажений достаточно пяти членов полинома. Таким образом, указанную модель можно записать следующими уравнениями:


$$\begin{aligned} \pi(\mathbf{x}, \mathbf{i}) &= \begin{bmatrix} f_x d(\theta) \frac{x}{r} \\ f_y d(\theta) \frac{y}{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta &= \text{atan2}(y, x) \\ d(\theta) &= \theta + k_1 \theta^3 + k_2 \theta^5 + k_3 \theta^7 + k_4 \theta^9 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Калибровка камеры по этой модели произведена с помощью библиотеки  OdoCamCalib, средняя ошибка перепроецирования составила 0.012 пикселя.

Scaramuzza Также большое распространение получила модель Скарамуззы [?], которая легла в основу Matlab Omnidirectional Camera Calibration Toolbox, что позволяет быстро и удобно производить калибровку параметров модели. Она связывает точки на изображении с соответствующей им точкой в координатах камеры следующим образом:

$$\pi^{-1}(\mathbf{u}, \mathbf{i}) = \lambda \begin{pmatrix} u \\ v \\ a_0 + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 \end{pmatrix}, \quad (1.2)$$

где r - расстояние от спроектированной точки до центра изображения; f - фокусное расстояние; λ - масштабный коэффициент.

Однако для устранения искажений необходима прямая проекция , которая не выражается в явном виде и находится методом Ньютона.

Средняя ошибка перепроецирования составила 0.12 пикселей.

Mei Модель Мея [?] изначально была создана для более эффективного моделирования катодиоптрических камер, но оказалась также весьма пригодной и для fisheye-камер.

$$\pi(\mathbf{x}, \mathbf{i}) = \begin{bmatrix} f_x \frac{x}{\alpha d + (1-\alpha)z} \\ f_y \frac{y}{\alpha d + (1-\alpha)z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Калибровка камеры по этой модели произведена с помощью библиотеки OdoCamCalib, средняя ошибка перепроецирования составила 0.013 пикселя.

Atan Эта модель представляет из себя идеальную эквидистантную fisheye-проекцию, которая заложена в использованную виртуальную камеру. Она добавлена к сравнению как эталонный способ устранения искажений из предположения, что с ней результаты стереосопоставления будут самыми лучшими.

$$\pi(\mathbf{x}, \mathbf{i}) = \begin{bmatrix} f_x \frac{\theta}{\sqrt{\frac{y^2}{x^2} + 1}} \\ f_y \frac{\theta}{\sqrt{\frac{x^2}{y^2} + 1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Таким образом, параметры всех моделей, используемых в сравнении, представлены в таблице ??.



1.2 Построение стереопары

Наиболее сильные искажения на изображении "рыбий глаз" возникают по краям изображения, поэтому исследуемая виртуальная стереопара построена так, чтобы зона пересечения полей зрения камер располагалась на максимальном удалении от центра. Это соответствует ортогональному расположению камер с углом между принципиальными осями в 90° . При этом объективы камер имеют одинаковые параметры, поле зрения в 180° , а расстояние между ними составляет 20см. Описанная конфигурация изображена на рисунке ??.

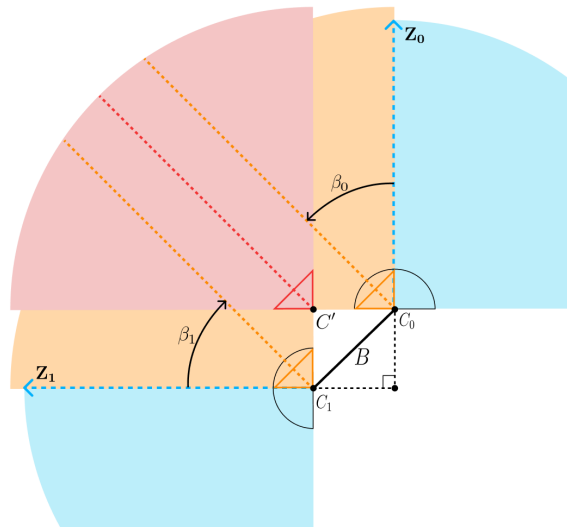


Рис. 3: Геометрическая модель бинокулярной системы стереозрения

Здесь область пересечения полей зрения камер C_0 и C_1 обозначенная красным. Эта область эквивалентна области пересечения полей зрения двух камер с полями зрения 90° (обозначены оранжевым), повернутых на $\beta_0 = \beta_1 = 45^\circ$ в сторону области интереса. Тогда B - база стереопары.

С помощью этой стереопары были получены снимки изображения шахматной доски, которые потом направлены в соответствующие программные пакеты для нахождения параметров каждой модели. Далее с помощью алгоритма [НИР] выполнялось устранение искажений для набора изображений, собранного виртуальными камерами. Пример входных и выходных снимков приведён на рисунке ?? . По полученной паре изображений можно проводить стереосопоставление.

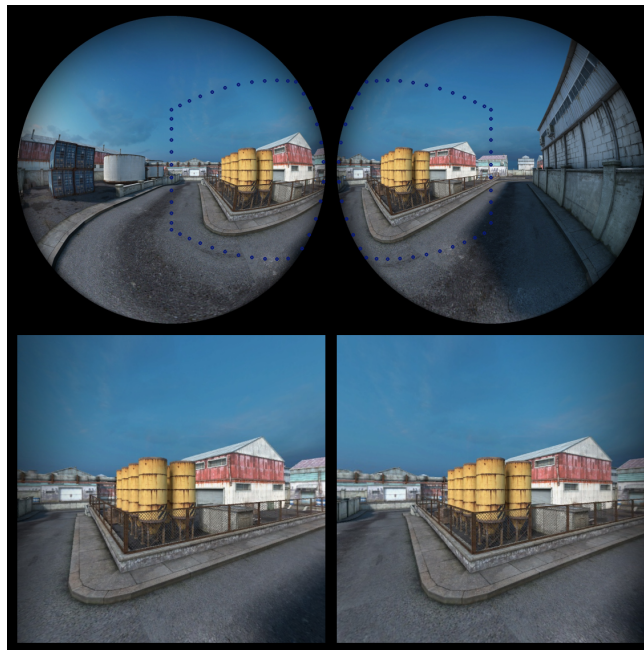


Рис. 4: Пример исходных изображений с отмеченной областью интереса и снимков виртуальной стереопары

1.3 Сравнение качества построения карт глубины

Оценка качества оценки глубины произведена на основе измерения среднеквадратичного отклонения и дисперсии полученных точек глубины от их предполагаемой позиции. Виртуальность эксперимента позволяет точно знать положение исследуемого объекта и, соответственно, точно определять ошибку. Кроме того, это позволяет изменять геометрические размеры исследуемого объекта в процессе исследования, чтобы его угловые размеры в поле зрения камеры оставались постоянными. Таким образом возможно получить карты глубины примерно одинаковой плоскости на всём диапазоне дистанций. Эффективность стереосопоставления [?] сильно зависит от текстуры наблюдаемого объекта, поэтому для устранения влияния этого фактора эксперименты были проведены с различными текстурами. Примеры использованных текстур приведены на рисунке ??.

Рис. 5: Пример использованных текстур

Результаты оценки качества нахождения глубины приведены на рисунке ??. По оси абсцисс отложено расстояние до исследуемого объекта, по

оси ординат среднеквадратичное отклонение. Каждый график соответствует своей модели.

Рис. 6: Результаты оценки качества нахождения глубины

Как можно заметить по графику, наилучший результат в оценке глубины логичным образом показывает эталонная стереопара. Далее следует идеальная модель, заложенная в виртуальную камеру, демонстрируя, что даже в случае идеального соответствие прямой и обратной проекции часть информации в изображении теряется или искажается. Из исследуемых моделей самую низкую ошибку демонстрирует модель Канналы и Брандта с результатом [число].

Далее рассмотрены разностные изображения для всех моделей на выбранном расстоянии. Примеры таких изображений приведены на рисунке ???. Можно заметить, особенно на менее точных моделях, что различия проявляются не равномерно по всему изображению, а увеличиваются по мере приближения к краю оригинального изображения. Эта неравномерность может приводить к тому, что плоскости, параллельные плоскости снимка, на карте глубины будут изображаться с некоторым скосом.

Рис. 7: Разностные изображения для всех моделей

Оценить описанный эффект можно аппроксимировав плоскость по полученному облаку точек и сравнив её нормаль с реальной. Аппроксимацию плоскости можно проводить методом RANSAC [], а в качестве меры соответствия векторов нормалей использовать их произведение. Результаты исследования [чего?] приведены на рисунке ??.

Рис. 8: Результаты исследования []

...

2 Выводы

Проведённые исследования показали, что в применении к стереозрению наилучшие результаты демонстрирует модель Канналы и Брандта.