

Исследование влияния света на работу сенсоров машинного зрения

*С. Мухамеджанов, Ю.А. Ляховенко, Т.Ю. Мельников, К.О. Чебунин,
И.Ю. Попов*

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург

Аннотация: Предмет исследования: исследовано влияние интенсивности источника света и направления его луча на процесс распознавание объектов сенсорами машинного зрения - камер видимого спектра и систем обнаружения и определения дальности с помощью света (Light Detection And Ranging - LiDAR). Учтены такие факторы, как интенсивность света, его траектория и угол луча относительно горизонта. Метод: решение задачи анализа способности сенсоров машинного зрения к распознаванию ArUco-маркера в условиях различных уровней освещенности построено на эмпирических методах исследования. Основные результаты: во время распознавания объектов камерой машинного зрения при высоком уровне освещенности произошло искажение светового потока на матрице камеры. Также были обнаружены ошибки в работе LiDAR. Практическая значимость: полученные результаты могут быть использованы для разработки средств снижения уровня влияния высокого уровня освещенности света на способность распознавания объектов сенсорами машинного зрения.

Ключевые слова: машинное зрение, LiDAR, влияние света, эмпирическое исследование.

Введение

Процесс распознавания объектов является неотъемлемой частью безопасного движения автономных транспортных средств. За распознавание объектов в представляемой работе был выбран процесс распознавания ArUco-маркера камерой видимого спектра и систем обнаружения и определения дальности с помощью света (Light Detection And Ranging - LiDAR).

Целью этого исследования было выявление зависимости способности к распознаванию объектов камерой видимого спектра и LiDAR от уровня освещенности и направления луча источника света в процессе работы сенсоров машинного зрения. Для этого были проведены управляемые экспериментальные исследования.

На распознавание объектов камерами видимого спектра влияет солнечный свет, который снижает производительность функций камеры как инструмента машинного зрения. Проблемой является выгорание

изображения под солнечным светом [1]. Таким образом, для систем машинного зрения необходимо исследовать не только алгоритмические, но и аппаратные усовершенствования.

Для решения подобной проблемы в последние годы были разработаны камеры с функцией расширенного динамического диапазона (High Dynamic Range - HDR).

Так, для автономного электрического исследовательского автомобиля Технологического университета Лоуренса, были использованы алгоритмы визуализации с HDR к системе машинного зрения [2], что улучшило производительность алгоритмов центрирования полосы движения автомобиля. Авторы показали, что HDR способен сохранять важные функции машинного зрения, такие, как контрастность и цвет, а также, что алгоритм слияния экспозиции Мертенса лучше подходит для сохранения данных изображений дорог, сделанных под прямыми солнечными лучами, чем Робертсона или Дебевека.

Авторы [3] исследовали распознавание светофоров для определения влияние разных погодных условий. Так, задача выявления и классификации объектов, является обязательной задачей безопасного движения автономных транспортных средств, авторы делают вывод о необходимости исследования проблемы сильного солнечного света как с программной, так и с аппаратной точки зрения.

Работы [4] и [5] начали рассматривать проблему калибровки камеры в сетевой установке. Оба подхода исследовали проблему с точки зрения компьютерного зрения без учета возможностей других сенсорных узлов. Первый предложил итеративный подход к локализации камер (положение, относительное смещение и ориентация до масштаба) с использованием линейных отношений и калибровки камеры прямым линейным преобразованием (Direct Linear Transform - DLT), разработанной Фожерасом

в [6]. Работа основана на более требовательных к вычислительным ресурсам методах факторизации, предложенных Штурмом и Триггсом в [7]. Камеры образуют микрокластеры с другими узлами в той же системе координат. Алгоритм локализации камеры требует наличия 4 камер, имеющих не менее 12 характерных точек в общем поле зрения. Алгоритм также предоставляет схему выравнивания кадров изображения. В статье [8] предложены улучшения качества кадров на основе билатерального фильтра, ориентированных градиентов и гамма-нормальной модели. В данном алгоритме, представленном в статье [9], предлагается выборочный анализ кадров, в котором делится видеопоток на кадры с разницей в 1 сек, что увеличивает скорость процедуры анализа и уменьшает объем кадров.

Методы исследования

Исследования проводились в лабораторном помещении размером 8 м х 4 м. Помещение оснащено 7 лампами и прожектором, которые имитировали различные уровни освещенности. Дополнительно использовался портативный люксметр.

В работе использовалась камера компании Basler (Германия) модели «Ace» и LiDAR компании Livox (Китай), модели «Mid-40». В ходе исследования были поставлены задачи анализа способности распознавания объектов сенсорами машинного зрения при различных условиях освещенности.

Работа с сенсорами проходила с использованием ArUco-маркеров. ArUco-маркер представляет собой синтетический квадратный маркер, состоящий из широкой черной рамки и внутренней бинарной матрицы, определяющей его идентификатор (id), в который закодировано число [10] с субпиксельной точностью. Подобный образ облегчает его быстрое обнаружение на изображении, а двоичная кодировка позволяет

идентифицировать его и применять методы обнаружения и исправления ошибок.

В ходе исследования были установлены уровни освещенности, которые обеспечиваются лампами и прожектором, от 0,001 Лк до 100000 Лк.

Используемые значения были выбраны, исходя из условий освещенности окружающей среды, с которой непосредственно взаимодействует автономный транспорт при сборе информации с помощью сенсоров машинного зрения.

За направление луча дополнительного источника света, который имитировал прожектор, были выбраны данные о траектории Солнца в городе Москве в дни весенне-осеннего равноденствия (22 марта и 22 сентября) и летнего и зимнего солнцестояния (22 июня и 22 декабря).

Для анализа полученных результатов распознавания сенсорами машинного зрения ArUco-маркера, были выбраны результаты работы камеры и LiDAR с уровнем освещенности 1000 Лк.

Результаты

Результаты работы камеры при различных уровнях освещенности

Для проведения анализа работы камеры машинного зрения в условиях различных уровней освещенности были вычислены гистограммы полученных черно-белых кадров в регионе интереса (ROI - Region Of Interest) ArUco-маркера.

Гистограмма яркости представляет собой дискретную функцию (1) [11]:

$$h(x_i) = n_i, r_i \in [0, L - 1], \quad (1)$$

где x_i - i -й уровень яркости L - максимальный уровень яркости; n_i - число пикселей, имеющих яркость x_i .

Задачей исследования работы камеры видимого спектра являлась оценка среднего значения яркости (2) и ее дисперсии (3).

Гистограмму можно рассматривать как приближение плотности распределения для яркости. Тогда среднее значение яркости определяется по формуле:

$$\underline{X} = \frac{1}{N} \sum_0^{255} (x_i \cdot n_i), \quad (2)$$

где x_i - i -й уровень яркости изображения, n_i - количество пикселей оттенка x_i , N - общее число пикселей кадра.

Дисперсия случайной величины x_i (яркости):

$$D = \frac{1}{N} \sum_0^{255} (x_i - \underline{X})^2 \cdot n_i. \quad (3)$$

После проведения расчетов были получены следующие результаты в таблице 1:

Таблица № 1

Средние значения и дисперсии яркости полученных кадров

Уровень освещенности, Лк	Среднее значение яркости	Дисперсия яркости
0	0,20	3,90
1	2,43	5,23
5	4,08	17,02
100	35,42	523,93
1000	101,60	2364,89
2000	127,77	4061,76
4000	150,76	3644,06
12000	202,45	3393,72

В ходе исследования работы камеры распознавания ArUco-маркера было невозможно:

- при уровнях освещенности от 0 Лк до 5 Лк из-за низкого значения яркости освещения сцены кадра;
- при уровне освещенности 12000 Лк из-за высокого среднего значения яркости, при котором появлялись белые пятна на кадре ввиду переотражения света на матрице камеры.

Из таблицы 1 видно, что уже при освещенности в 4000 Лк, снижается контрастность изображения, при этом яркость кадра повышается, что в итоге может привести к ошибке распознавания объектов камерой машинного зрения.

Результаты работы камеры при различных уровнях освещенности дополнительного источника света

В этой части исследования способности распознавания объектов камерой машинного зрения дополнительный источник света имитировал прожектор. Как и в предыдущем разделе, были вычислены средние значения и дисперсии яркости изображения.

Стоит отметить, что при уровне освещенности 100000 Лк, полученном с помощью прожектора, установленного на высоте 1,5 метра от камеры, был симитирован восход Солнца с контрольными точками при положении прожектора под углами $23,5^\circ$, 47° и 70° относительно главной оптической оси камеры. Для остальных уровней освещенности был установлен угол в $23,5^\circ$.

Из таблицы 2 видно, что при высоких уровнях освещенности, равных 12000 Лк и 17000 Лк, кадры становились менее контрастными из-за направления луча света, а также на изображении появлялись артефакты в виде белых пятен, что может привести к ошибке распознавания объекта камерой.

Далее, при освещенности 100000 Лк, был симитирован восход Солнца. При направлении луча в $23,5^\circ$ кадр становился абсолютно белым, что

показывает среднее значение яркости по ROI $\bar{X} = 255$, а также отсутствие разброса от средней яркости $D = 0$. При увеличении угла до 47° , среднее значение яркости снизилось, но это не привело к улучшению способности камеры определить ArUco-маркер. Когда угол увеличился до 70° , контрастность кадра резко выросла, а также снизилась яркость, что позволило камере распознать ArUco-маркер.

Таблица № 2

Средние значения и дисперсии яркости полученных кадров при различных уровнях освещенности дополнительного источника света

Угол положения относительно горизонта	Дополнительный источник света, Лк	Среднее значение гистограммы яркости	Дисперсия гистограммы яркости
$23,5^\circ$	12000	108,26	229,27
$23,5^\circ$	17000	82,00	336,34
$23,5^\circ$	100000	255,00	0
47°	100000	251,65	70,31
70°	100000	116,39	4182,03

Результаты работы LiDAR при различных уровнях освещенности помещения и дополнительного источника света

Исследование работы LiDAR проводилось при тех же уровнях освещенности, что и для камеры. Расстояние между сенсором и калибровочной доской составило 8 метров. Используемые ранее уровни освещенности не повлияли на работу LiDAR, за исключением одного параметра: чем ниже был уровень освещенности, тем выше был уровень шумов на кадре. Увеличения уровня шума не повлиял на работу LiDAR - отображение на кадре калибровочной доски было четким и различимым.

Инструмент работы с использованным LiDAR - Livox Viewer обладает нужными функциями по снижению уровня шумов до их минимального значения путем определения того, является ли точка выборки шумовой на основе искажения формы соседней волны, а также на основе пространственного распределения соседних точек. При этом была выявлена ошибка при распознавании ArUco-маркера LiDAR из-за переотражения света. Данная ошибка была решена с помощью светодиодной ленты, которая выделяла контур маркера (Рисунок 1, масштаб 1:50).

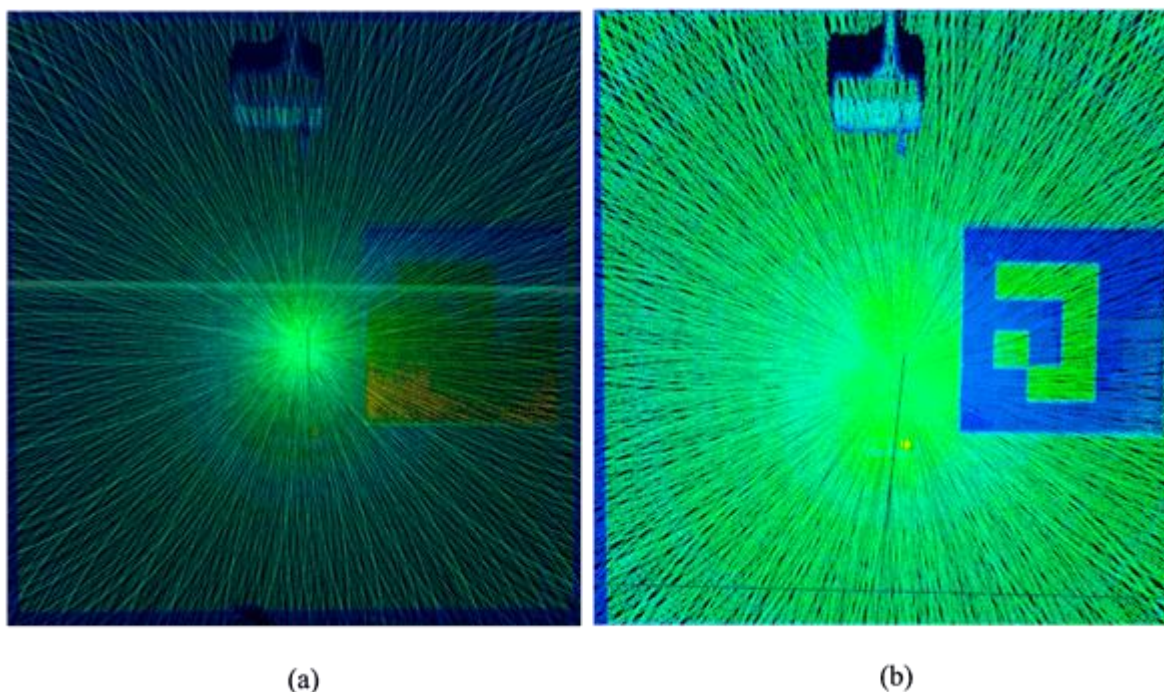


Рис. 1. – Работа LiDAR: (a) переотражение света ArUco-маркером; (b) решение проблемы переотражения с помощью светодиодной ленты

Заключение

В ходе проведенного анализа работы сенсоров машинного зрения в условиях различных уровней освещенности было выявлено его непосредственное влияние на способность камеры машинного зрения и LiDAR к распознаванию ArUco-маркера.

Так, для камеры было невозможно распознавание объекта при уровне освещенности от 0 Лк до 5 Лк и от 12000 Лк, а также при наличии дополнительного источника освещения с интенсивностью уровня освещенности более 100000 Лк. Можно сделать вывод, что распознавания объектов будет также невозможно ввиду искажения светового потока на матрице и появления артефактов на кадре. Подобные проблемы могут стать потенциальными источниками причинения вреда, особенно для беспилотного транспорта.

Для снижения риска возникновения подобных ситуаций возможно использование дублирующих камеру сенсоров, таких, как LiDAR. При наличии бликов в визуальной информации, полученной камерой, базовая система должна предоставить больше полномочий LiDAR для решения проблем распознавания объектов, таким образом будет снижено влияние визуальной информации, пропущенной камерой видимого спектра.

Литература

1. Lacroix S. A. M., Lacroix A. and Bonnafous D. and Bauzil G. and Fleury S. and Herrb M. and Chatila R. Autonomous Rover Navigation on Unknown Terrains: Functions and Integration, 2002, V. 21(10), pp. 917–942. DOI: 10.1177/027836402128964152.
2. Paul N., Chung C. J. Application of HDR algorithms to solve direct sunlight problems when autonomous vehicles using machine vision systems are driving into sun // Computers in Industry. 2018. V. 98. pp. 192-196. DOI: 10.1016/j.compind.2018.03.011.
3. Yoneda K., Suganuma, N., Yanase, R., & Aldibaja, M. Automated driving recognition technologies for adverse weather conditions // IATSS research. 2019. V. 43. №. 4. pp. 253-262.

4. Mantzel W. E., Choi H., Baraniuk R. G. Distributed camera network localization // Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004. IEEE, 2004. V. 2. Pp. 1381-1386.

5. Devarajan D. and Radke R., "Distributed metric calibration for large-scale camera networks". Handbook of Ambient Intelligence and Smart Environments 2004. pp. 35-55.

6. Maybank S. J., Faugeras O. D. A theory of self-calibration of a moving camera // International journal of computer vision. 1992. V. 8. №. 2. pp. 123-151.

7. Sturm P., Triggs B. A factorization based algorithm for multi-image projective structure and motion // Computer Vision—ECCV'96: 4th European Conference on Computer Vision Cambridge, UK, April 15–18, 1996 Proceedings Volume II 4. Springer Berlin Heidelberg, 1996. P. 709-720.

8. Мосева М.С., Харрасов К.Р. О существующих методах удаления зашумлений на изображении // Инженерный вестник Дона, 2023, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8643.

9. Никитин Д.В., Тараненко И.С., Катаев А.В. Детектирование дорожных знаков на основе нейросетевой модели YOLO // Инженерный вестник Дона, 2023, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8531.

10. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., and Marín-Jiménez, M. J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion // Pattern Recognition. 2014. V. 47. №. 6. pp. 2280-2292.

11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Litres, 2022. 616 с.

References

1. Lacroix S. A. M., Lacroix A. and Bonnafous D. and Bauzil G. and Fleury S. and Herrb M. and Chatila R. Autonomous Rover Navigation on Unknown Terrains: Functions and Integration. 2002. V. 21(10), pp. 917–942. DOI: 10.1177/027836402128964152.



2. Paul N., Chung C. J. Computers in Industry. 2018. V. 98, pp. 192-196. DOI: 10.1016/j.compind.2018.03.011.
3. Yoneda K., Suganuma, N., Yanase, R., & Aldibaja, M. Automated driving recognition technologies for adverse weather conditions. IATSS research. 2019. V. 43(4), pp. 253-262.
4. Mantzel W. E., Choi H., Baraniuk R. G. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 2004. V. 2, pp. 1381-1386.
5. Devarajan D. and Radke R. Handbook of Ambient Intelligence and Smart Environments. 2004. pp. 35-55.
6. Maybank S. J., Faugeras O. D. International journal of computer vision. 1992. V. 8(2), pp. 123-151
7. Sturm P., Triggs B. A factorization based algorithm for multi-image projective structure and motion. Computer Vision—ECCV'96: 4th European Conference on Computer Vision Cambridge, UK, April 15–18, 1996 Proceedings Volume II 4. Springer Berlin Heidelberg, 1996. pp. 709-720.
8. Moseva M.S., Harrasov K.R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8643.
9. Nikitin D.V., Taranenko I.S., Kataev A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8531.
10. Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., and Marín-Jiménez, M. J. Pattern Recognition. 2014. V. 47(6), pp. 2280-2292.
11. Gonsales R., Vuds R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij [Digital image processing]. Litres, 2022. 616 p.