УДК 378:004
DOI: 10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-586-594

Разработка метода повышения плотности и качества лидарного сканирования на основе зеркального усиления механических LiDAR-систем

М. Р. Вишневский, И. Ю. Фёдоров
НИТУ «МИСИС», Москва, Россия

Development of a method to enhance LiDAR scanning density and quality through mirrors in mechanical systems

M. R. Vishnevskiy, I. Yu. Fyedorov
NUST MISIS, Moscow, Russia

Аннотация. В работе рассмотрен инновационный подход к повышению плотности и качества облаков точек, создаваемых механическим LiDAR, путем введения настраиваемого пассивного оптического элемента — зеркала. Анализируется влияние положения зеркала на точность и детализацию сканируемых объектов. Экспериментально продемонстрировано, что применение зеркального усиления позволяет существенно увеличить плотность точек и обеспечить более равномерное покрытие пространства, сохраняя простоту конструкции самого датчика сканирования. Приведены результаты практических исследований и моделирования, демонстрирующих высокую эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: LiDAR, облака точек, зеркальное сканирование, плотность точек.

Введение

Современные робототехнические системы, входящие в состав сложных аппаратных и программных комплексов на базе ИИ [1], наряду с технологиями глубокого обучения, оснащаются многочисленными настраиваемыми датчиками, обладающими возможностью адаптации к изменяющимся условиям физической среды [2]. Это предполагает наличие все возрастающих требований к производительности, миниатюризации и энергоэффективности LiDAR-сенсоров, определяющих их ключевую роль в формировании облаков точек в 3D-пространстве наблюдаемой сцены и создании областей с повышенной плотностью сканирования [3] для повышения ситуационной осведомленности, необходимой для безопасной навигации и предотвращения возможных столкновений. Существующие решения, направленные на повышение плотности облаков точек, включают микро-электромеханические системы (MEMS) [4, 5] и оптические фазированные решётки (OPA-LiDAR) [6, 7]. Они обладают рядом достоинств, среди которых высокая точность измерений, надежность, возможность электронного управления лучом и отсутствие механических движущихся элементов [8, 9]. В частности, OPA-LiDAR предусматривает интеграцию лазерного источника, схем распределения мощности, фазовращателей, амплитудных модуляторов, массива излучателей и волноводных соединений, занимающих значительную площадь чипа. Для обеспечения низкого уровня перекрестных помех элементы размещают на заданном минимальном расстоянии друг от друга. Таким образом, достижение высокой плотности излучения требует нахождения тонкого баланса между сложностью схемы, быстродействием, масштабируемостью и уровнем потерь энергии в многоканальной распределённой сети питания [10]. Несмотря на перспективность и потенциал OPA-LiDAR стать высокоэффективной и доступной технологией, на сегодняшний день её сложность и высокая стоимость ограничивают массовое распространение в мобильных устройствах и бюджетном сегменте рынка [11,12].

Механические LiDAR-устройства остаются наиболее распространенными благодаря приемлемому соотношению стоимости и производительности, однако они сталкиваются с существенными недостатками по пространственному разрешению и качеству покрытия сцены [13]. Ограниченность вызвана периодичностью сканирующих лучей и появлением визуальных артефактов при высоких скоростях перемещения и сложных условиях окружающей среды [14, 15].

Традиционным способом преодоления указанных ограничений является установка нескольких LiDAR в тех местах сканирующего модуля, где информация об окружающей среде может быть

получена в максимально возможном объеме. Углы и положение каждого сенсора влияют на зоны покрытия и мертвые зоны. Увеличение числа сканирующих датчиков ведет к росту плотности данных и увеличению потока информации, но также усложняет конструкцию, увеличивая затраты и необходимость решения сложной оптимизационной задачи оптимального размещения в рамках конструктивных ограничений установки [16].

Перспективной альтернативой увеличения числа сенсоров и применения дорогостоящих OPA является использование пассивных оптических компонентов, таких как зеркало [17, 18, 19], которые позволяют расширить область сканирования и создать дополнительный виртуальный канал без значительного роста стоимости системы. Подобные схемы уже применялись для повышения детализации и улучшения покрытия сложных сцен [20, 14], особенно в задачах, где часть объектов экранирована или затенена.

Несмотря на накопленный опыт, в большинстве работ основной акцент делается на аппаратную реализацию или локальные геометрические настройки, тогда как формальный количественный анализ прироста плотности и полноты покрытия сцены остаётся недостаточно проработанным.

В данном исследовании представлен простой и воспроизводимый метод повышения плотности LiDAR-сканирования с помощью пассивного зеркала, не требующий сложной калибровки или оптимизации положения. На примере как симуляционного, так и реального эксперимента демонстрируется, что подобное решение позволяет существенно увеличить информативность и равномерность облаков точек при минимальных затратах на доработку аппаратной части.

Постановка задачи

В последние годы задача повышения плотности и качества облаков точек, получаемых с помощью лидарных систем, становится всё более актуальной для широкого спектра приложений — от обнаружения и классификации объектов [21, 22] и автономной навигации [23, 24] до создания высокодетализированных трёхмерных моделей и инспекции инфраструктурных объектов [25, 26, 27, 28]. Существующие подходы к увеличению плотности точек включают активные методы на основе микроэлектромеханических систем (MEMS) [8, 4, 5] и оптических фазированных решёток (OPA) [6], а также пассивные схемы с использованием зеркал и призм [19, 18, 17]. При всех достоинствах, активные MEMS и OPA решения требуют сложной аппаратной реализации и отличаются высокой стоимостью и чувствительностью к внешним воздействиям [29, 6, 14, 9, 11], что ограничивает их применение в мобильных и бюджетных системах [30, 13]. Пассивные методы, напротив, обладают преимуществами по простоте интеграции и стоимости, сохраняя при этом возможность значительного улучшения характеристик сканирования.

Целью настоящего исследования является разработка и экспериментальная верификация простого и воспроизводимого метода повышения плотности и качества облаков точек для механических LiDAR-сенсоров за счёт использования пассивной зеркальной оптики. Такой подход должен обеспечить увеличение пространственной информативности и детализации облаков точек при минимальном усложнении аппаратной конструкции, что особенно важно для задач, требующих высокой точности и однородности восприятия окружающей среды (например, автономная навигация роботов, точное картирование и реконструкция сложных объектов).

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

- проведён анализ современных подходов к увеличению плотности и качества LiDAR-сканирования, включая методы с использованием зеркальной оптики [14, 19, 18];
- предложена и реализована методика размещения зеркала относительно сенсора, позволяющая существенно расширить охват сцены при минимальных потерях мощности сигнала. Данный подход базируется на инженерных решениях, аналогичных тем, что рассматривались в ряде публикаций [31, 32], где анализируется влияние параметров зеркала на качество регистрации;
- экспериментально подтверждена применимость предложенного метода для повышения пространственной информативности облаков точек на примере механического LiDAR Velodyne VLP-16 в симуляционной среде Gazebo;
- оценена эффективность метода на основе формальных количественных метрик: плотности точек и заполненности воксельной сетки [33, 15].

Методы и алгоритмы

В данной работе реализован альтернативный подход к повышению плотности и качества сканирования: для создания дополнительного виртуального канала используется статичное зеркало, отражающее часть лазерных импульсов без аппаратных модификаций базового LiDAR [17, 18]. Такой метод позволяет сохранить ключевые преимущества механических лидаров — надёжность, доступную стоимость и достаточную точность [15, 13, 34], а также преодолеть ограничения регулярного сканирующего паттерна и проблемы с «мертвыми зонами» при быстром движении или наличии мелких объектов [35, 24]. Принцип работы предлагаемого метода схематично представлен на рисунке 1.

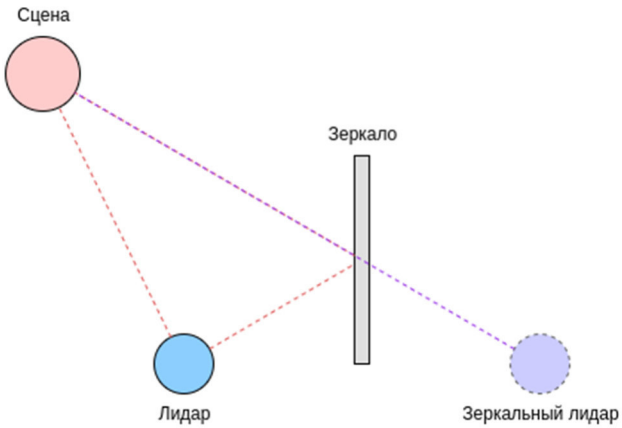

Рис. 1. Схема предлагаемой методики: LiDAR Velodyne VLP-16 (*слева*) испускает лазерные импульсы, часть из которых отражается от статичного зеркала, образуя дополнительный виртуальный канал сканирования

Аппаратная конфигурация. В качестве базового сенсора выбран LiDAR Velodyne VLP-16, широко применяемый благодаря хорошему соотношению цены и качества, а также проверенной надёжности [13, 30]. Зеркало размещалось таким образом, чтобы обеспечить расширение вертикального угла обзора. Угол наклона определялся с учётом минимизации потерь мощности лазерного сигнала и исключения зон с тенями [31, 17, 18].

Процесс сбора данных. Для экспериментов использовалась симуляционная среда Gazebo с фреймворком ROS, что позволяло удобно моделировать различные сцены и эффективно работать с облаками точек [36, 37]. Данные от LiDAR собирались в формате PointCloud2, а разделение на прямые и зеркально отражённые каналы осуществлялось программно.

Алгоритмы обработки и калибровки. Для регистрации прямых и отражённых облаков точек применялись методы библиотеки Point Cloud Library (PCL), в частности алгоритм ICP для регистрации и RANSAC для сегментации плоскостей [38, 26].

Отметим, что вопросы детальной калибровки отражающей поверхности и высокоточного совмещения облаков точек в рамках данной работы сознательно не рассматривались: основной целью было экспериментально подтвердить сам принцип повышения плотности и пространственного охвата облака точек за счёт зеркального канала. Дальнейшая проработка вопросов калибровки и оптимизации параметров планируется в будущих исследованиях.

Таким образом, предложенная методика позволяет повысить плотность и пространственную информативность облаков точек без аппаратных усложнений сенсора, что делает её привлекательной для широкого класса прикладных задач.

Результаты экспериментов

Постановка эксперимента. В экспериментах сравнивались облака точек, полученные как в симуляционной среде Gazebo, так и при реальном сканировании сцены с использованием LiDAR с пассивным зеркалом.

Для объективной количественной оценки информативности данных применялась **вокселизация**: пространство сцены разбивалось на регулярную трёхмерную сетку одинаковых кубических элементов (вокселей) с размером от 0,1 до 1,0 м. Воксель считался занятым, если в его пределах находится хотя бы одна точка облака. Далее рассчитывались две метрики:

- **плотность облака точек** — среднее количество точек на занятый воксель, характеризующее детализацию и разрешение сканирования;
- **заполненность воксельной сетки** — доля занятых вокселей от общего их числа, характеризующая полноту и равномерность покрытия сцены.

Такой анализ позволяет формально сравнивать различные конфигурации сенсора, выявлять «мертвые зоны» и количественно оценивать прирост информативности при использовании зеркального канала.

Эксперимент в симуляторе

Для наглядности на рисунке 2*а* и 2*г* приведена визуализация исходной симуляционной сцены в Gazebo. Далее на рисунках 2*б*, 2*в* и 2*д*, 2*е* показаны сравнения облаков точек по разным проекциям для стандартной и зеркальной конфигураций.

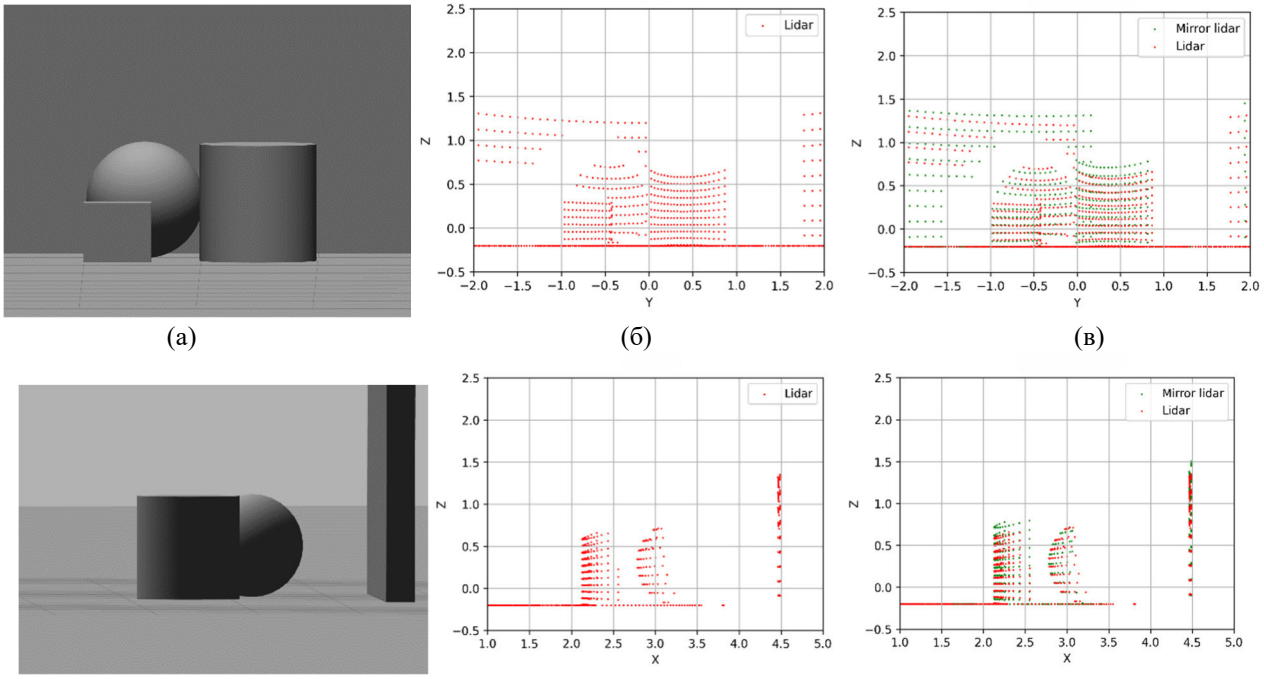

Рис. 2. Визуализация облаков точек в симуляторе (проекция X (*а-в*) и ***Y*** (*г-е*):
слева — вид с виртуальной камеры, *в центре* — облако точек с оригинального лидара, *справа* — с зеркалом

Наибольший прирост заполненности сетки (табл. 2) отмечается при размерах вокселя от 0,1 до 0,25 м, где увеличение числа занятых вокселей составляет от 20 до 50 %. Например, при размере 0,1 м количество занятых вокселей увеличилось с 86 до 129, а относительный прирост составил 50 %. Для более грубой дискретизации (0,5 и 1,0 м) разница между конфигурациями практически исчезает.

Как видно из таблицы 1, зеркальный канал позволяет существенно увеличить как полноту покрытия, так и плотность точек при малых и средних размерах вокселя.

Таблица 1. **Симуляция: сравнение количества занятых вокселей и плотности точек (L – один лидар; LM – лидар + зеркало)**

Воксель, м	Занято вокселей (L)	Занято вокселей (LM)	Прирост, %	Точек на воксель (L)	Точек на воксель (LM)
0,10	86	129	50,0	3,16	3,18
0,20	46	61	32,6	5,91	6,72
0,25	40	48	20,0	6,80	8,54
0,50	16	16	0,0	17,0	25,63
1,00	4	4	0,0	68,0	102,5

Эксперимент с реальным лидаром

Аналогичный эксперимент был проведён на реальной установке (рис. 4). На рисунках 3*а*, *б* показаны облака точек в проекции по оси X, а на рисунках 3*в*, *г* — в проекции по оси У; в обоих случаях слева приведены данные без зеркала, справа — с зеркалом. Метрики рассчитывались по тем же правилам, а ключевые результаты приведены в таблице 2.

Для размера вокселя 0,25 м число занятых вокселей возросло с 37 до 52 (+40,5 %), а для 0,10 м – с 179 до 230 (+28,5 %). Плотность точек на воксель также существенно увеличилась для всех разрешений.

Таблица 2. **Реальный эксперимент: сравнение количества занятых вокселей и плотности точек (L – один лидар; LM – лидар + зеркало)**

Воксель, м	Занято вокселей (L)	Занято вокселей (LM)	Прирост, %	Точек на воксель (L)	Точек на воксель (LM)
0,10	179	230	28,5	10,62	15,09
0,20	44	58	31,8	43,20	59,84
0,25	37	52	40,5	51,38	66,75
0,50	11	11	0,0	172,82	315,55
1,00	4	4	0,0	475,25	867,75

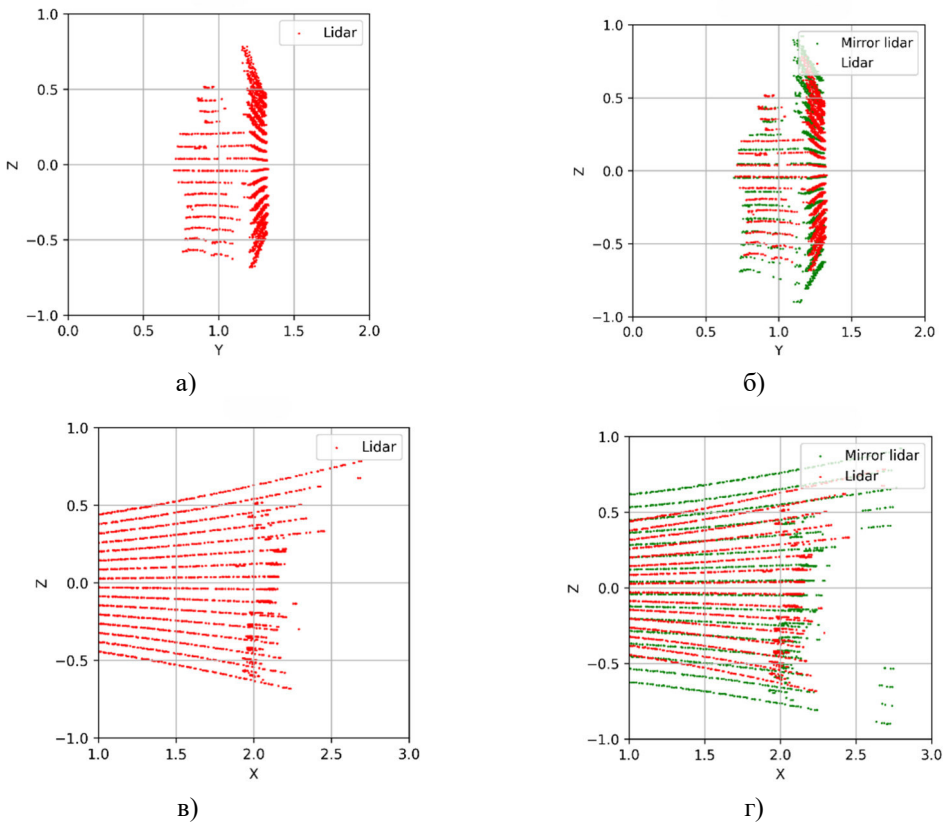

Рис. 3. Вид облаков точек с реального эксперимента (проекция ***X*** (*а*, *б*) и ***Y*** (*в*, *г*): *слева* — без зеркала, *справа* — с зеркалом

Результаты оценки. Результаты как симуляционного, так и реального эксперимента подтверждают, что введение зеркала существенно увеличивает плотность и полноту облаков точек, особенно на мелких и средних размерах вокселей (от 0,1 до 0,25 м). Так, максимальный прирост заполненности сетки достигал от 28,5 до 50 % в зависимости от сцены и выбранного разрешения, что наиболее важно для задач высокой детализации — например, инспекции сложных объектов или построения 3Э-моделей с минимальным числом «слепых зон».

Наибольшее относительное увеличение плотности точек отмечалось при грубой дискретизации (1,0 м), где средняя плотность возросла с 68 до 102,5 точек на воксель в симуляции и с 475 до 868 точек на воксель

в реальном эксперименте. Однако именно при мелких размерах вокселя (0,10-0,25 м) зеркало обеспечивает заполнение ранее недоступных областей и существенный прирост информативности облака.

Повышение плотности и заполненности облака точек непосредственно влияет на качество последующей реконструкции поверхности, сегментации и извлечения признаков, а также на устойчивость алгоритмов при наличии затенённых или сложно структурированных объектов.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе экспериментов результаты подтверждают первоначальную гипотезу о том, что дополнительный зеркальный канал является эффективным методом повышения качества сканирования без необходимости усложнять конструкцию базового механического лидара [17, 18]. Значительный прирост плотности точек и заполненности воксельной сетки свидетельствует о существенном улучшении детализации и равномерности покрытия сцены, что подтверждается также ранее опубликованными результатами, полученными при использовании многоракурсных или пассивно-модифицированных систем [19, 22]. Особенно наглядно эти преимущества проявляются при высоких разрешениях, что делает предложенное решение перспективным для применений, требующих высокой точности и пространственной полноты, таких как инспекция инфраструктуры [28], создание цифровых двойников объектов [25, 26], а также картографирование и ориентация в условиях без доступа к спутниковой системе навигации [39].

Особого внимания заслуживает различие в характере изменения метрики заполненности при варьировании размера вокселя: в симуляции прирост уменьшается по мере укрупнения, тогда как в реальном эксперименте наблюдается обратная зависимость. В первом случае дополнительные точки зеркального канала заполняют главным образом мелкие детали сцены и при увеличении размера вокселя их вклад сглаживается. Во втором случае на данные существенно влияют шумы и небольшие погрешности регистрации: при мелкой дискретизации часть ячеек остаётся пустой, тогда как при укрупнении вокселя шум усредняется и эффект от зеркального канала проявляется более отчётливо.

Рис. 4. Фотографии реальной экспериментальной установки с зеркалом и LiDAR

Предложенный метод прост в реализации и не требует конструктивных изменений сенсора, что облегчает его интеграцию в существующие аппаратные платформы. Это особенно актуально в условиях ограниченных бюджетов и энергоэффективных сценариев, где использование более дорогих и сложных технологий, таких как MEMS и оптические фазированные решётки (OPA), может быть затруднено или нецелесообразно [6, 11, 4].

Таким образом, проведённые эксперименты демонстрируют не только техническую реализуемость, но и высокую практическую ценность зеркального канала сканирования для мобильных

робототехнических систем, задач инспекции, ЭБ-моделирования и автономной навигации, где требуется высокая детализация, равномерность и надёжность пространственного восприятия [40, 41, 42].

Заключение

В рамках настоящего исследования разработан и экспериментально подтверждён эффективный метод повышения плотности и качества LiDAR-сканирования за счёт использования пассивной зеркальной оптики. Метод продемонстрировал высокую эффективность, выразившуюся в значительном увеличении плотности точек и полноты покрытия сцены без аппаратного усложнения сенсора [35]. Одним из потенциальных ограничений предложенного метода является искажение геометрии из-за неточной калибровки зеркала, что может повлиять на точность конечных измерений. Это ограничение должно быть изучено в дальнейших работах.

Предложенное решение обеспечивает доступное и практичное улучшение характеристик механических LiDAR-систем, открывая широкие перспективы применения в различных областях робототехники, автономной навигации и ЭБ-моделирования [23, 24, 12]. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию геометрии зеркал и разработку адаптивных систем для повышения качества сканирования в различных условиях эксплуатации [43, 44].

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке кафедры инженерной кибернетики НИТУ «МИСИС».

Список литературы

1. V. Anand, B. Lohani, G. Pandey, R. Mishra, Advancing lidar intensity simulation through learning with novel physics-based modalities, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (2025).
2. V. Bharati, Lidar+ camera sensor data fusion on mobiles with ai-based virtual sensors to provide situational awareness for the visually impaired, in: 2021 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), IEEE, 2021, pp. 1-6.
3. A. Shomer, S. Avidan, Prior based sampling for adaptive lidar, arXiv preprint arXiv:2304.07099 (2023).
4. D. Wang, C. Watkins, H. Xie, Mems mirrors for lidar: A review, Micromachines 11 (2020) 456. doi:10.3390/mi11050456.
5. D. Yang, Y. Liu, Q. Chen, M. Chen, S. Zhan, N.-k. Cheung, H.-Y. Chan, Z. Wang, W. J. Li, Development of the high angular resolution 360° lidar based on scanning mems mirror, Scientific Reports 13 (2023). doi:10.1038/s41598-022-26394-6.
6. W. Xu, Q. Yuan, Y. Yang, L. Lu, J. Chen, L. Zhou, Progress and prospects for lidar-oriented optical phased arrays based on photonic integrated circuits, npj Nanophotonics 2 (2025). URL: https://www.nature.com/articles/s44310-025-00059-4. doi:10.1038/s44310-025-00059-4.
7. Y. Fu, B. Chen, W. Yue, M. Tao, H. Zhao, Y. Li, X. Li, H. Qu, X. Li, X. Hu, et al., Target-adaptive optical phased array lidar, Photonics Research 12 (2024) 904-911.
8. A. Kasturi, V. Milanovic, D. Lovell, F. Hu, D. Ho, Y. Su, L. Ristic, Comparison of mems mirror lidar architectures, in: MOEMS and Miniaturized Systems XIX, volume 11345 of *Proc. SPIE,* 2020, p. 113450G. doi:10.1117/12.2556248.
9. C. Altuntas, Review of scanning and pixel array-based lidar point-cloud measurement techniques to capture 3d shape or motion, Applied Sciences 13 (2023) 6488. doi:10.3390/app13116488.
10. W. Xu, Q. Yuan, Y. Yang, L. Lu, J. Chen, L. Zhou, Progress and prospects for lidar-oriented optical phased arrays based on photonic integrated circuits, npj Nanophotonics 2 (2025) 14.
11. J. Zhou, A review of lidar sensor technologies for perception in automated driving, Academic Journal of Science and Technology 3 (2022) 255-260.
12. S. Royo, M. Ballesta-Garcia, An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles, Applied Sciences 9 (2019) 4093. doi:10.3390/app9194093.
13. J. Schulte-Tigges, M. Forster, G. Nikolovski, M. Reke, A. Ferrein, D. Kaszner, D. Matheis, T. Walter, Benchmarking of various lidar sensors for use in self-driving vehicles in real- world environments, Sensors 22 (2022) 7146. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/19/7146. doi:10.3390/s22197146.
14. T. Raj, F. H. Hashim, A. B. Huddin, M. F. Ibrahim, A. Hussain, A survey on lidar scanning mechanisms, Electronics 9 (2020) 741. doi:10.3390/electronics9050741.
15. M. Gunn, Lidar sensors simplified: Part 1 - lidar system point density, returns and beam divergence, https://aevex.com/ lidar-sensors-simplified-part-1-lidar-system-point-density-returns-and-beam-divergence/, 2022.
16. T.-H. Kim, T.-H. Park, Placement optimization of multiple lidar sensors for autonomous vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 21 (2019) 2139-2145.

17. K. Matsubara, K. Nagatani, Y. Hirata, Improvement in measurement area of 3d lidar for a mobile robot using a mirror mounted on a manipulator, in: 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2020, pp. 9523-9530. URL: https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9340822. doi:10.1109/IROS45743.2020.9340822.

18. J. E. Kibii, A. Dreher, P. L. Wormser, H. Gimpel, Design and calibration of plane mirror setups for mobile robots with a 2d-lidar, Sensors 22 (2022) 7830. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/20/7830. doi:10.3390/s22207830.

19. M. Pogacnik, M. Munih, Towards a multi-perspective time of flight laser ranging device based on mirrors and prisms, Applied Sciences 12 (2022) 7121. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/12/14/7121. doi:10.3390/app12147121.

20. J. Morales, V. Plaza-Leiva, A. Mandow, J. A. Gomez-Ruiz, J. Seron, A. Garria-Cerezo, Analysis of 3d scan measurement distribution with application to a multi-beam lidar on a rotating platform, Sensors 18 (2018) 395. doi:10.3390/s18020395.

21. Y. Zhou, et al., End-to-end multi-view fusion for 3d object detection in lidar point clouds, in: Proceedings of the 3rd Conference on Robot Learning (CoRL 2019), volume 100 of *Proceedings of Machine Learning Research,* 2019, pp. 923-932. URL: https://proceedings.mlr.press/v100/zhou20a. html.

22. K. Schrab, F. Hilgerdenaar, R. Protzmann, I. Radusch, Improving object detection through multi-perspective lidar fusion, in: Proceedings of the 11th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (VEHITS), 2025, pp. 448-457. doi:10.5220/ 0013283600003941.

23. C. Huang, LiDAR-based 3D Perception from Multi-frame Point Clouds for Autonomous Driving, Ph.d. thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2025.

24. D. Lee, M. Jung, W. Yang, A. Kim, Lidar odometry survey: Recent advancements and remaining challenges, Intelligent Service Robotics 17 (2024) 95-118. doi:10.1007/ S11370-024-00515-8.

25. U. R. Kumar, I. Coudron, S. Puttemans, P. Vandewalle, Quality assessment for 3d reconstruction of building interiors, Journal of Imaging Science and Technology 62 (2018) 010402-1-010402-10. URL: https://library.imaging.org/ei/articles/62/1/010402. doi:10.2352/J. ImagingSci.Technol.2018.62.1.010402.

26. S. O. Elberink, G. Vosselman, Quality analysis on 3d building models reconstructed from airborne laser scanning data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66 (2012) 157-165. doi:10.1016/j.isprsjprs.2011.10.005.

27. B. Mitka, P. Klapa, P. Gawronek, Laboratory tests of metrological characteristics of a non-repetitive low-cost mobile handheld laser scanner, Sensors 24 (2024) 6010. URL: https://www.mdpi.com/ 1424-8220/24/18/6010. doi:10.3390/s24186010.

28. B. Ramlal, D. Archibald, R. Al-Tahir, M. Sutherland, D. Davis, Assessment of multi-perspective and multi-sensor data for urban strata mapping, Research Square (2023). doi: 10.21203/rs.3. rs-2599958/v1.

29. D. Yang, W. J. Li, M. Chen, X. Yu, Q. Chen, G. Zhang, Enhancing point cloud density using mems mirror-based focusing for lidar systems, Research Square (2024). doi:10.21203/rs.3. rs-4652241/v1.

30. C. Kelly, B. Wilkinson, A. Abd-Elrahman, O. Cordero, H. A. Lassiter, Accuracy assessment of low-cost lidar scanners: An analysis of the velodyne hdl-32e and livox mid-40's temporal stability, Remote Sensing 14 (2022) 4220. doi: 10.3390/rs14174220.

31. A. Shaker, W. Y. Yan, N. El-Ashmawy, The effects of laser reflection angle on radiometric correction of the airborne lidar intensity data, in: ISPRS Archives, volume XXXVIII-5/W12, 2011, pp. 213-218.

32. J. Goettsche, S. Alexopoulos, A. Dummler, S. K. Maddineni, Multi-mirror array calculations with optical error, in: SolarPACES 2020 International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, 2020. URL: https://www.solarpaces-conference.org/, paper ID 02005.

33. TopoDOT, Establishing requirements, extracting metrics and evaluating quality of lidar data, 2015. URL: https://blog.topodot.com/establishing-requirements-extracting-metrics-and-evaluating-quality-of-lidar-data/, techNote #1021.

34. Y. Li, L. Ma, C. Wang, J. Li, M. Chapman, An overview of lidar requirements and techniques for autonomous driving, in: 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2021, pp. 1-7. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9435580. doi:10.1109/ICRA48506.2021.9435580.

35. P. Trybala, J. Szrek, B. Dfbogorski, B. Ziftek, J. Blachowski, J. Wodecki, R. Zimroz, Analysis of lidar actuator system influence on the quality of dense 3d point cloud obtained with slam, Sensors 23 (2023) 721. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/721. doi:10.3390/s23020721.

36. V. Kroumov, F. Smarandache, Simulation environment for mobile robots testing using ros and gazebo, in: 2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2016, pp. 96-101. doi:10.1109/ICSTCC.2016.7790647.

37. A. Lazaro Enguita, UGV Navigation in ROS using LIDAR 3D, Master's thesis, Universidad de Alcala, 2016.

38. M. Wang, Y.-H. Tseng, Automatic segmentation of lidar data into coplanar point clusters using an octree-based split-and-merge algorithm, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 76 (2010) 407-420.

39. H. Sier, et al., A benchmark for multi-modal lidar slam with ground truth in gnss-denied environments, Remote Sensing 15 (2023) 3314. doi:10.3390/rs15133314.

40. S. Manivasagam, S. Wang, K. Wong, W. Zeng, M. Sazanovich, S. Tan, B. Yang, W.-C. Ma, R. Urtasun, Lidarsim: Realistic lidar simulation by leveraging the real world, in: IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020, pp. 11167-11176. URL: https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2020/html/Manivasagam_LiDARsim_Realistic_LiDAR_Simulation_by_Leveraging_the_Real_World_CVPR_2020_paper.html.

41. Y.-C. Lin, J. Shao, S.-Y. Shin, Z. Saka, M. Joseph, R. Manish, S. Fei, A. Habib, Comparative analysis of multi-platform, multi-resolution, multi-temporal lidar data for forest inventory, Remote Sensing 14 (2022) 649. doi:10.3390/rs14030649.

42. L. Ma, Y. Li, J. Li, C. Wang, R. Wang, M. A. Chapman, Mobile laser scanned point-clouds for road object detection and extraction: A review, Remote Sensing 10 (2018) 1531. URL: https: //www.mdpi.com/2072-4292/10/10/1531. doi:10.3390/rs10101531.

43. H. You, F. Xu, Y. Ye, P. Xia, J. Du, Adaptive lidar scanning based on rgb information, Automation in Construction (2024). doi: 10.1016/j.autcon.2024.105265. URL: https: //www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580524000736.

44. F. Noichl, D. D. Lichti, A. Borrmann, Automating adaptive scan planning for static laser scanning in complex 3d environments, Automation in Construction 165 (2024) 105511. doi:10.1016/j. autcon.2024.105511.