

Симулација компромиса у дизајну лидара за анализу саобраћаја пре производње сензора

Simulating LIDAR Design Tradeoffs for Traffic Analytics Before Sensor Production

Теодора Лазић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – У овом раду представљена је методологија за симулацију и анализу различитих подешавања лидар сензора у контексту саобраћајне аналитике. Полазна основа представља обраду реалних облака тачака, њихова трансформација у сферни координатни систем и издвајање региона од интереса који одговарају препознатим возилима. Кроз симулацију различитих параметара сензора, анализиран је њихов утицај на количину и квалитет задржаних података. Добијени резултати показују како промене подешавања сензора утичу на перформансе саобраћајне аналитике пре саме производње уређаја.

Кључне речи: лидар, симулирање сензора, облак тачака, препознавање возила, просторна резолуција

Abstract – This paper presents the methodology for a simulation and analysis of different LiDAR sensor's configurations in the context of traffic analytics. The starting point is the processing of real point clouds, their transformation in spherical coordinate system and the extraction of regions of interest corresponding to the detected vehicles. Through the simulation of various sensor parameters, their impact on the quantity and quality of the retained data was analyzed. The obtained results show how changes in sensor configuration affect the performance of traffic analytics before the device is manufactured.

Keywords: LiDAR, sensor simulation, point cloud, vehicle detection, spatial resolution

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Ненад Четић, доцент.

1. УВОД

Лидар (енг. LiDAR - Light Detection and Ranging) технологија представља важну сензорску платформу у савременим системима за праћење саобраћаја и анализу окружења. Генерисањем тродимензионалних облака тачака омогућава прецизно препознавање и локализацију објеката у реалном времену. Параметри сензора, попут просторне резолуције, максималног

домета и видног поља, значајно утичу на количину и квалитет прикупљених података.

Циљ овог рада је симулација утицаја различитих лидар параметара на квалитет и обим података релевантних за саобраћајну аналитику, применом алгоритама за трансформацију координата, филтрирање региона од интереса и контролисану измену параметара сензора на реалним облацима тачака.

2. КОНЦЕПТ И ЗНАЧАЈ СИМУЛАЦИЈЕ ЛИДАР СЕНЗОРА

2.1. Теоријске основе лидар сензора

Лидар представља активну сензорску технологију засновану на емитовању ласерских импулса и мерењу времена њиховог повратка након рефлексије од објеката у окружењу. На основу времена проласка сигнала израчунава се растојање до објекта, што омогућава формирање тродимензионалне репрезентације простора у облику облака тачака [1].

2.2. Параметри дизајна лидар система

Избор параметара представља кључни инжењерски компромис између резолуције, домета, поузданости препознавања, количине генерисаних података и цене уређаја. Описани су најзначајнији параметри који дефинишу карактеристике лидар сензора, односно, просторна резолуција, домет, видно поље, број ласерских канала, брзина скенирања и тачност и шум мерења.

2.3. Значај симулације пре производње

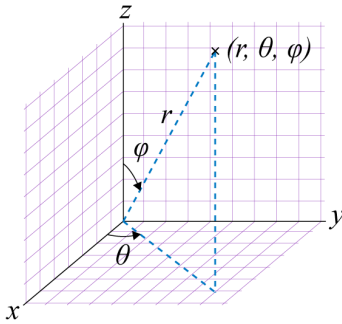
Симулација не замењује физичко тестирање, али представља кључни корак у процесу оптимизације дизајна, јер омогућава систематску анализу параметара у контролисаном и репродуктивном окружењу. Савремени приступи, као што је *LiDARsim*, користе комбинацију физички заснованог моделовања и машинског учења ради генерисања реалистичних лидар облака тачака у виртуелним окружењима. За разлику од таквих приступа, у овом раду симулација се заснива на модификацији реално измерених облака тачака, чиме се омогућава анализа утицаја параметара сензора на процес саобраћајне аналитике без потребе

за сложеним моделовањем окружења и процеса мерења [2].

3. СИМУЛАЦИЈА ПАРАМЕТАРА ЛИДАР СЕНЗОРА

3.1. Припрема података и координатна трансформација

У циљу симулације параметара сензора који су директно повезани са угаоним карактеристикама емитовања ласерских зрака (азимут, елевација, видно поље), извршена је трансформација Декартових координата у сферни координатни систем. Оваква репрезентација омогућава примену алгоритама развијених за 2D слике, што је искоришћено и у радовима као што је *RangeNet++*, где се сферна пројекција користи као улаз у конволутивне неуронске мреже за семантичку сегментацију лидар података [3].



Слика 1. Конверзија просторних координата у сферне координате [4]

На слици 1. је графички приказана конверзија просторних координата у сферне координате, а математички изрази за израчунавање су приказани испод (1), (2) и (3).

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (2)$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{Z}{r}\right) \quad (3)$$

где је:

r - домет (енг. *range*), односно удаљеност тачке од сензора,

θ - азимутални угао (хоризонтална ротација),

ϕ - елевациони угао (вертикално одступање).

Из сферних координата лидар облака генерише се панорамска слика која представља 360° хоризонтални приказ окружења. Овако добијена панорама служи као улаз за алгоритам препознавања објеката у 2D домену. На панорамским снимцима примећује се *YOLO* алгоритам препознавања објеката, који идентификује возила и формира граничне оквире (енг. *bounding box*) са проценом поузданости.

3.2. Симулација просторне резолуције

Простор се дели на правилну тродимензионалну мрежу кубичних ћелија тј. воксела (енг. *voxel*) димензије v . Све тачке које припадају истом вокселу замењују се једном репрезентативном тачком, најчешће њиховим центроидом. За тачку (X, Y, Z) , индекс воксела одређује се као што је приказано у изразу (4):

$$i = \left\lfloor \frac{X}{v} \right\rfloor, j = \left\lfloor \frac{Y}{v} \right\rfloor, k = \left\lfloor \frac{Z}{v} \right\rfloor \quad (4)$$

Све тачке са истим индексом (i, j, k) групишу се у једну ћелију. Репрезентативна тачка се израчунава као што је приказано изразима (5), (6) и (7):

$$X_c = \left(\frac{1}{n}\right) \sum X_i \quad (5)$$

$$Y_c = \left(\frac{1}{n}\right) \sum Y_i \quad (6)$$

$$Z_c = \left(\frac{1}{n}\right) \sum Z_i \quad (7)$$

где је n број тачака унутар посматраног воксела. Величина воксела v представља контролни параметар симулације. У контексту урбаних саобраћајних сцена, типичне вредности могу се груписати на следећи начин:

- **$v = 0.01 \text{ m (1 cm)}$**
Врло фина просторна репрезентација. Задржава већину геометријских детаља, погодна за анализу облика возила и прецизнију сегментацију. Симулација високорезолуционог лидар система.
- **$v = 0.02 \text{ m (2 cm)}$**
Умерена редукција броја тачака уз очување основне геометрије возила, погодна за анализу компромиса између перформанси и количине података.
- **$v = 0.03 \text{ m (3 cm)}$**
Израженија редукција густине тачака, при чему се задржава глобална форма већих објеката, уз могућ губитак ситних детаља.
- **$v \geq 0.05 \text{ m (5 cm и више)}$**
Агресивна редукција која доводи до приметног губитка финијих детаља, нарочито на ивицама и мањим елементима. Симулација сензора ниже просторне резолуције.

3.3. Симулација ограничења домета

Већи домет омогућава раније учовање објеката, али:

- повећава количину података,
- захтева већу снагу и потрошњу енергије,
- може увести више шума на великим удаљеностима.

Мањи домет смањује количину података и хардверске захтеве, али ограничава просторну покривеност.

Симулација ограничења домета заснива се на једноставном услову (8):

$$r \leq R_{max} \quad (8)$$

где је R_{max} максимални домет симулираног сензора. Тачке које не задовољавају овај услов се уклањају из облака.

3.4. Симулација угаоне покривености

У реалним системима, лидар сензори могу имати пуну 360° хоризонталну покривеност (ротациони сензори), али и ограничен азимутални опсег, у зависности од конструкције и намене. Симулација ограничене азимуталне покривености реализована је дефинисањем интервала (9):

$$\theta \in [\theta_{min}, \theta_{max}] \quad (9)$$

где је θ азимутални угао сваке тачке у сферном координатном систему. Тачке чији азимут не припада дефинисаном интервалу елиминишу се из облака.

Поред хоризонталне покривености, значајан параметар је и вертикално видно поље, које дефинише опсег елевационих углова у коме сензор региструје повратни сигнал. Вертикално видно поље се дефинише као (10):

$$\varphi \in [\varphi_{min}, \varphi_{max}] \quad (10)$$

где је φ елевациони угао тачке. Симулација се врши елиминацијом тачака чија елевација не припада задатом интервалу. Са аспекта пројектовања лидар сензора, анализа ових параметара је од изузетног значаја јер омогућава одређивање минималне неопходне угаоне покривености која обезбеђује поуздано препознавање возила, уз истовремено смањење комплексности и цене будућег уређаја.

3.5. Филтрирање објеката од интереса

Након што је завршено препроцесирање облака тачака, долазимо до последњег дела, а то је провера утицаја промењених параметара на само препознавање објеката од интереса. Координате 2D оквира пресликавају се у одговарајуће опсеге сферних углова. На основу добијених угаоних граница формира се логичка маска над прерађеним облаком тачака, која задржава само оне 3D тачке чији азимут и елевација припадају дефинисаном опсегу. На овај начин се из почетног облака издваја подскуп тачака који просторном пројекцијом одговара препознатим возилима. Филтрирање 3D тачака на основу 2D препознавања подразумева више геометријских трансформација, што може довести до нумеричких и геометријских проблема, као што су:

- неслагање координатних система
- дискретизација и гранични ефекти
- проблем преласка преко границе $0 - 2\pi$
- утицај просторне редукције

4. РЕЗУЛТАТИ

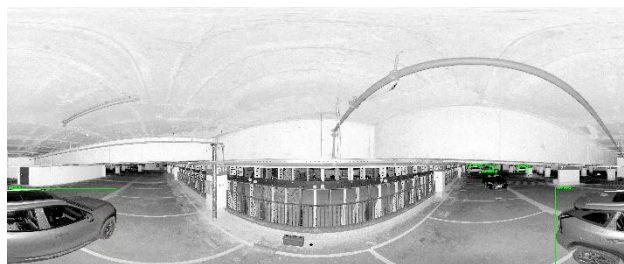
4.1. Утицај просторне резолуције

У оквиру експерименталног дела рада анализиран је утицај просторне резолуције облака тачака на успешност издвајања објеката од интереса. Просторна резолуција симулирана је применом вокселског смањења узорковања са различитим величинама воксела. Промена параметра v представља апстрактни модел измене хардверске конфигурације сензора.

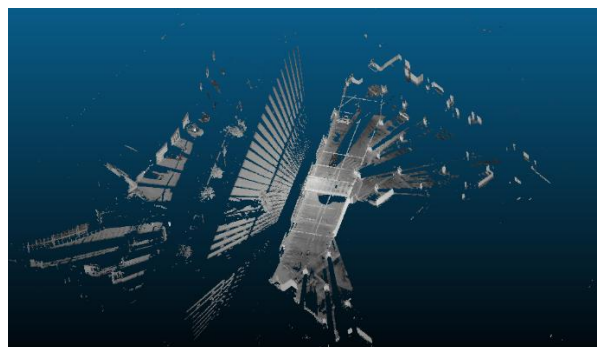
• Практична имплементација

Првобитна имплементација вокселског смањења узорковања је одрађена уз помоћ *numpy* библиотеке јер чува све сферне координате. После успешно одрађеног препроцесирања, на ред долази креирање новог E57 фајла уз помоћ функције *pye57.write_scan_raw()*, међутим долази до губитка сферних координата, односно, сама функција не прави фајл са сферичном структуром. Пошто нам је неопходно да се сачувају сферне координате које се после користе за филтрирање, настаје идеја да се оне израчунавају на основу картизијанских координата. Због оптимизације времена извршавања препроцесирања, настаје имплементација вокселског смањења узорковања уз помоћ *open3d* библиотеке, широко прихваћеног open-source оквира за обраду 3D података који пружа ефикасне алгоритме за рад са облацима тачака, мрежама и RGB-D подацима [5]. Експерименти су спроведени над већим бројем скенова али за потребе рада ће бити приказани резултати примене смањења узорковања над четири скена:

- **scan001** (3 препозната возила),
- **scan004-2m** (6 препознатих возила на једној страни облака одсечено све даље од 2m удаљености)
- **scan004** (6 препознатих возила)
- **scan008** (5 препознатих возила).



Слика 2. Панорама извучена из скена број 004 (за скен 004-2m је иста)



Слика 3. Пример облака тачака скена број 004

На слици 2. имамо два возила која се налазе у крупном кадру, односно налазили су се близу самог сензора у току мерења, као и четири возила на десној половини слике која су у даљини али ипак препозната на панорами, а на слици 3. је облак тачака из којег је извучена панорама. Аутомобили који су ближе сензору обухватају много више простора на панорами, а самим тим и тачака унутар облака тачака, те чак смањивање резолуције на агресивнији начин би оставило довољно

података за њихово препознавање. Овај закључак дефинитивно не можемо да имамо када су у питању возила која се налазе у даљини.

Табела 1. Приказ приближне редукције након обраде облака

Величина воксела при смањењу узорковања	Приближна редукција
5cm	99%
3cm	98.5%
2cm	97.3%
1cm	93.5%

Након примене првобитног филтера возила, ни за једно возило нису пронађене тачке у облаку, те је било неопходно извршити одређени број корекција које су описане у наредном поглављу. Након њиховог додавања, добијени су следећи резултати.

- **scan001** - 2/3 препозната возила,
- **scan004-2m** - 0/6 препознатих возила,
- **scan004** - 3/6 препознатих возила,
- **scan008** - 2/5 препозната возила.

Иако је број тачака изузетно редукован у сваком скену, што приказује Табела 1, филтрирање је дало исте резултате за све величине воксела. То указује да на успешност издвајања возила није пресудно утицала сама просторна резолуција, већ пре свега положај возила у односу на сензор и његова угаона величина на панорами.

При резолуцији од 2 cm успешно су издвојена два возила у блиском плану, док удаљенија и мања возила нису задржала довољан број тачака након проређивања. Разлог је што густина лидар мерења природно опада са растојањем услед фиксног угаоног корака скенирања.

При резолуцији од 1 cm задржан је већи број тачака по возилу, што је довело до стабилнијег филтрирања прва два возила у кадру.

Посебно је интересантан скен 004-2m, код којег су из облака тачака уклоњене све тачке удаљене више од 2 m од лидара. Иако би се очекивало боље препознавање објеката у блиском плану, након филтрирања није успешно издвојено ниједно возило, вероватно зато што се већина возила налазила изван задатог домета.

4.2. Геометријска корекција и стабилизација филтрирања

- **Инверзија угаоних оса**

Панорамска слика представља 360° пројекцију сцене, али са хоризонталним огледањем (енг. *mirroring*). Због тога је било неопходно извршити инверзију азимуталног угла приликом пресликавања 2D координата граничних оквира у сферни координатни систем.

- **Провера опсега азимута**

Додатно је уведена провера да ли опсег азимута прелази границу од 0/2 π . У случајевима када гранични оквир пресеца угаону границу, класична провера опсега није довољна, те је имплементирана условна логика која омогућава исправно филтрирање и у том сценарију. Овај корак је спречио губитак тачака у ситуацијама када се возило налази близу угаоног прелаза.

• Угаоно проширење

У циљу повећања стабилности филтрирања, уведено је умерено угаоно проширење (енг. *padding*) азимуталног и елевационог опсега. Разлог за ово је чињеница да гранични оквир у 2D домену не представља савршено прецизну пројекцију 3D објекта, као и да вокселско смањење узорковања може довести до губитка граничних тачака.

5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду приказан је приступ симулацији компромиса у дизајну лидар сензора за примене у саобраћајној аналитици, са циљем процене утицаја кључних параметара пре саме производње уређаја. Посебна пажња посвећена је симулацији смањења просторне резолуције применом методе вокселског смањења узорковања, као и геометријској корекцији и стабилизацији филтрирања. Показано је да промене величине воксела директно утичу на број задржаних тачака и детаљност репрезентације објеката, што је значајан фактор при пројектовању система за препознавање и праћење возила.

Добијени резултати указују да је могуће симулирати утицај дизајнерских одлука (резолуција, угаона покривеност, домет) над постојећим лидар подацима и на тај начин проценити потенцијалне перформансе система пре његове реализације.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Santiago Royo, Maria Ballesta-Garcia, *An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles*, 2019
- [2] Sivabalan Manivasagam, Shenlong Wang, *LiDARsim: Realistic LiDAR Simulation by Leveraging the Real World*.
- [3] Andres Milioto, Ignazio Vizzo, Jens Behley, Cyrill Stachniss, *RangeNet++: Fast and Accurate LiDAR Semantic Segmentation*
- [4] <https://cdn1.byjus.com/wp-content/uploads/2019/>
- [5] Quin-Yi Zhou, Jaesik Park, Vladlen Koltun, Intel Labs, *Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing*

Кратка биографија:



Теодора Лазич рођена је у Зрењанину 2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Рачунарска техника и рачунарске комуникације одбранила је 2026.год.

Контакт: tmijovic108@gmail.com