

МИНІСТЭРСТВА АДУКАЦЫІ РЭСПУБЛІКІ БЕЛАРУСЬ

БЕЛАРУСКІ ДЗЯРЖАЎНЫ УНІВЕРСІТЭТ

Факультэт прыкладной матэматыкі і інфарматыкі

Кафедра дыскрэтнай матэматыкі і алгарытмікі

**РЭКАНСТРУКЦЫЯ ПАВЕРХНІ ПА ДАДЗЕНЫХ З  
БЕСПЛОТНЫХ ЛЯТАЛЬНЫХ АПАРАТАЎ**

Курсавы праект

Богдана Уладзіслава Уладзіміравіча  
студэнта 3 курса  
спецыяльнасць "інфарматыка"

Навуковы кіраўнік:  
Тузікаў Аляксандр Васільевіч  
ген. дырэктар АІПІ НАН Беларусі,  
прафесар кафедры ДМА,  
доктар фіз.-мат. навук

Мінск, 2016

## **Анатацыя**

У курсавым праэкце разгледжаныя этапы решэння задачы трохмернай рэканструкцыі паверхні па дадзеных з БПЛА (беспілотных лятальных аппаратов). Праведзеная серыя эксперыментаў з рознымі наборамі дадзеных, прадастаўленыя альтэрнатыўныя шляхі аптымізацыі алгарытма пабудовы мадэлі.

## **Аннотация**

В курсовом проекте рассмотрены этапы решения задачи трёхмерной реконструкции поверхности по данным с БПЛА (беспилотных летательных аппаратов). Проведена серия экспериментов с различными наборами данных, предоставлены альтернативные способы оптимизации алгоритма построения модели.

## **Annotation**

The stages of the problem of three-dimensional surface reconstruction based on data from UAV (unmanned aerial vehicle) are considered. The series of experiments were held, alternative ways of optimization of the algorithm of reconstruction were proposed.

# Змест

Уводзіны . . . . .	4
Тэарэтычнае абгрунтаванне . . . . .	5
Вылуччэнне ключавых кропак . . . . .	5
Спалуччэнне ключавых кропак . . . . .	6
Агульная задача рэканструкцыі паверхні . . . . .	7
Асаблівасці задачы рэканструкцыі па дадзеных з БПЛА . . . . .	10
Практычная рэалізацыя . . . . .	12
Рэалізацыя фармата файла дадатковых дадзеных . . . . .	12
Кантроль над алгарытмам . . . . .	13
Серый эксперымент . . . . .	14
Іншыя спосабы ацэнкі вынікаў . . . . .	15
Высновы . . . . .	17
Спіс крыніцаў . . . . .	18

# Уводзіны

З шырокім распаўсюдам беспілотных лятальных апаратоў і камераў бытавога прызначэння вырастает патрэбнасць у хуткай і надзеінай апрацоўцы атрыманых дадзеных. Найбольш натуральным і наглядным падыходам у арганізацыі дадзеных (здымкаў, а таксама дадзеных, атрыманых з дадатковых прыладаў, усталяваных на борце лятальнага апарата, такіх як GPS-датчык) з'яўляецца пабудова трохмернай мадэлі мясцовасці.

Задача мае вялікае прыкладное значэнне ў разнастайных сферах дзейнасці: картаграфія, сельская гаспадарка, архітэктура, горнадобыўчая дзейнасць, экалогія. Задача можа ўзнінуць пры ацэнцы пашкоджанняў мясцовасці пасля прыродных катастрофаў, пры маніторынгу будоўлі аб'ектаў, адсочванні стану навакольнага асяроддзя.

Перад намі ставіцца задача хутка і якасна правесці рэканструкцыю паверхні, візуалізаваць мясцовасць для наступнага аналізу прадстаўнікамі любых сфераў дзейнасці.

У гэтым курсавым праэкце будзе разгледжаная як агульная задача рэканструкцыі паверхні па наборы здымкаў, зробленых звычайнай бытавой камерай, так і спосабы аптымізацыі і паскарэння працэса рэканструкцыі, улічваючы спецыфіку нашай задачы.

## Тэарэтычнае абгрунтуванне

У гэтай частцы курсавога праекта будзе тэарэтычна апісаная задача рэканструкцыі паверхні, разгледжаныя этапы яе рашэння. Будзе апісаная як агульная задача, так і асаблівасці рашэння задачы пры наяўнасці дадатковых дадзеных.

Задачу рэканструкцыі паверхні (задачу рэканструкцыі любога трохмернага аб'екта) можна падзяліць на некалькі этапаў:

- вылучэнне ключавых кропак (англ. Feature Extraction),
- спалучэнне кропак на розных выявах, якія адпавядаюць адной і той жа кропцы прасторы (англ. Feature Matching),
- пабудова разрэджанага воблака кропак на аснове спалучэнняў, атрыманых на папярэднім этапе рэканструкцыі,
- ушчыльненне атрыманага воблака, нанясенне тэкстураў і г.д.

### Вылучэнне ключавых кропак



Малюнак 1: зыходная выява

Вылучэнне ключавых кропак на выяве з'яўляецца адной з базавых аперацыяў задачы апрацоўцы выяваў. Сутнасць у пошуку кропак, якія валодаюць вызначанымі ўласцівасцямі і ў пастаноўцы ім у адпаведнасць



Малюнак 2: выява з нанесенымі ключавымі кропкамі (SIFT)

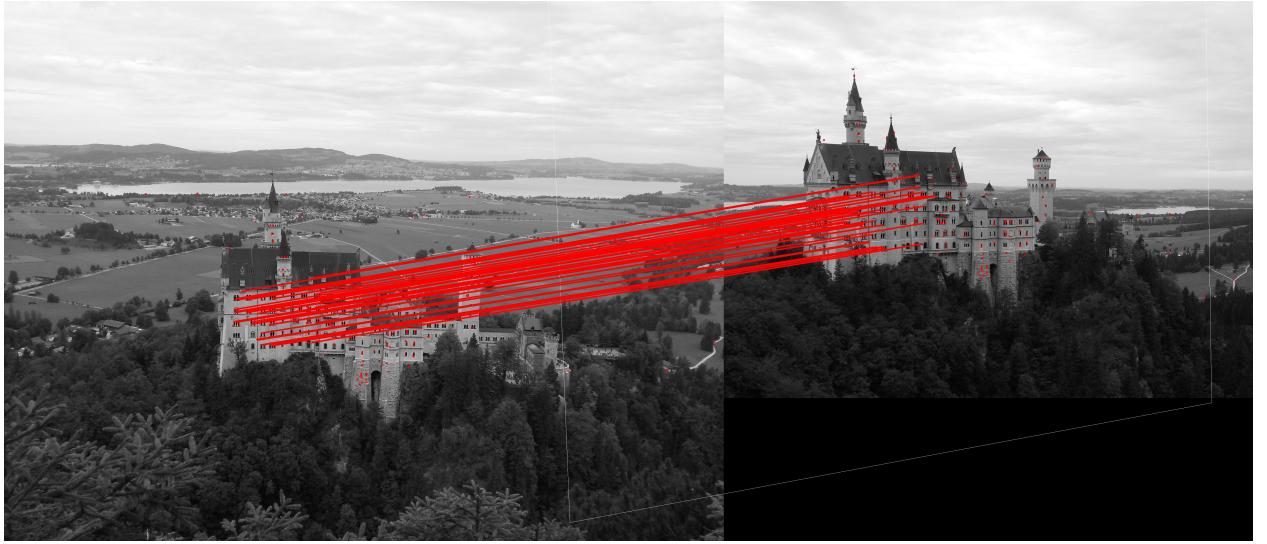
дэскрыптара, які апісьвае гэтую кропку. Фармат дэскрыптара адрозніваецца ў залежнасці ад алгарытма, які мы прымняем для вылучэння ключавых кропак.

Існуе вялікая колькасць алгарытмаў вылучэння ключавых кропак, якія могуць быць з рознай паспяховасцю прымененыя да адрозных набораў дадзеных. Напрыклад, для выяваў з вялікімі перападамі яскравасці і канстрасту можа быць эфектыўна прыменены алгарытм вылучэння межаў (англ. Edge detection) альбо алгарытм пошуку кутоў (англ. Corner detection). Найбольш распаўсюджанымі алгарытмамі агульнага прымянення з'яўляюцца SIFT, SURF, ORB і іншыя.

На малюнку 2 можна бачыць візуалізацыю знайдзеных алгарытмам SIFT ключавых кропак.

## Спалучэнне адпаведных ключавых кропак

Пасля таго, як для кожнай выявы з набора мы атрымалі мноства ключавых кропак, перад намі ставіцца задача пошуку кропак, якія адпавядаюць адным і тым жа кропкам у рэальнай прасторы. Праз тое, што кожная кропка апісьваецца сваім дэскрыптарам, мы шукаем кропкі з найменшай адлегласцю паміж сабой (функцыя адлегласці вызначаецца у залежнасці ад таго, які тып дэскрыптара мы выкарыстоўваем) і аб'яднам, што гэтыя пары (тройкі, і г.д.) кропак на выявах адпавядаюць адной кропцы ў прасторы. Такія мноствы кропак называюцца трэкамі.



Малюнак 3: вынік пошуку адпаведнасця ў паміж ключавымі кропкамі

Напрасцейшым шляхам пошуку адпаведнасця ёсць падлік адлегласці паміж усімі парамі кропак, упараткованне па росце адлегласці і выбар вызначанай колькасці найлепшых супадзенняў (англ. Brute Force Matching).

На малюнку 3 можна бачыць нанесеныя простыя лініі, якія злучаюць кропкі, адпаведныя адной і той жа кропцы прасторы. Дэскрыптары былі падлічаныя алгарытмам SIFT.

## Агульная задача рэканструкцыя паверхні Асноўныя азначэнні і паняцці

Пад рэканструкцыяй паверхні мы маем на ўвазе пабудову воблака кропак - мноства кропак у прасторы, якія суадносяцца паміж сабой як рэальныя, у выніку чаго воблака кропак дае нам уяўленне пра ўзаемнае размяшчэнне аб'ектаў на сцэне. Наступным этапам рэканструкцыі паверхні можа стаць "ушчыльненне" воблака і атрыманне сапраўднай трохмернай мадэлі, што, аднак, выходзіць за межы нашага праекта. Спынімся падрабязней на пабудове разрэджанага воблака кропак.

У залежнасці ад набора дадзеных, якімі мы распараражаемся, задача рэканструкцыі можа адрознівацца. Пачнем з самай агульной задачы.

**Камера** - прылада, якая ажыццяўляе праэкцыю трохмернай кропкі на плоскасць. Пры наяўнасці ўсіх патрэбных для таго параметраў, мы можам паўтарыць праэкцыю. Кожная камера задаецца наступнымі параметрамі:

- $f$  - фокусная адлегласць.
- $k_1, k_2$  - параметры скажэння.

- $R$  -  $3 \times 3$  матрыца павароту.
- $t$  -  $3 \times 1$  вектар зрушэння камеры адносна нейкай вызначанай кропкі прасторы.

Першыя два пункты адносяць да ўнутраных параметраў камеры, апошнія два - да вонкавых. Унутраныя параметры камеры вызначаюцца вытворцамі і не мяняюцца падчас выкарыстання камеры (хіба што ў выніку пэўнага фізічнага ўздзеяння). Вонкавыя ж параметры камеры вызначаюцца пазіцыяй камеры ў прасторы і ўнікальныя для кожнага ўнікальнага становішча камеры.

Такім чынам, для кожнай камеры справядлівым наступныя ўраўненні: Пераўтварэнне з міравых каардынатаў, у каардынаты камеры:

$$Q = RP + t, \quad (1)$$

$P \in \mathbb{R}^3$  - кропка ў трохмернай прасторы.

$$q = - \begin{pmatrix} Q_x/Q_z \\ Q_y/Q_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Канверсія ў піксельныя каарданаты:

$$p = f \cdot (1 + k_1 \cdot \|q\|^2 + k_2 \cdot \|q\|^4) \cdot q \quad (3)$$

## Заданне матрыцы павароту праз кватэрніоны

Альтэрнатывай апісанай вышэй матрыцы павароту памера  $3 \times 3$  можа быць апісанне павароту з дапамогай кватэрніонаў.

**Кватэрніоны** - сістэма гіперкамплексных лікаў, якія ўтвараюць вектарную прастору размернасцю 4 над полем рэчаісных лікаў.

Кватэрніон можа быць прадстаўлены як фармальная сума  $q(a, b, c, d) = a + bi + cj + dk$ , дзе  $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ ,  $i, j, k$  - уяўныя адзінкі, такія, што  $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$ .

Кватэрніон часта запісываецца як пара  $(a, \vec{u})$ , дзе  $a \in \mathbb{R}$ ,  $\vec{u} = (b, c, d) \in \mathbb{R}^3$  - вектар у трохмернай прасторы, што дае нагоду задумашца аб прымяненні кватэрніонаў для заданняў паваротаў у трохмернай прасторы.

Негледзячы на тое, што кватэрніоны не знайшлі шырокага прымянення, іх выкарыстанне часта апраўданае ў некаторых галінах матэматыкі ды інфарматыкі, такіх як камп'ютарная графіка, навігацыя альбо праграмаванне гульняў. Кватэрніоны мінімальнай колькасцю скалярных параметраў задаюць паварот, пры гэтым яны пазбаўленыя выраджанасці, якая сустракаецца пра заданні паварота пры дапамозе толькі трох параметраў (напрыклад - вугламі Эйлера).

Няхай маем кватэрніон  $q = (w, x, y, z)$ , тады матрыца павароту можа быць запісаная праз кватэрніон як:

$$R = \begin{pmatrix} 1 - 2y^2 - 2z^2 & 2xy - 2zw & 2xz + 2yw \\ 2xy + 2zw & 1 - 2x^2 - 2z^2 & 2yz - 2xw \\ 2xz - 2yw & 2yz + 2xw & 1 - 2x^2 - 2y^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Праз гэтую формулу пераходзім ад павароту камеры, запісанага з дапамогай квартэніона, да формулаў (1) - (3).

## Пастаноўка задачы рэканструкцыі

Задача аднаўлення трохмерных каардынатаў кропак па наборы выявах, зробленых з розных ракурсаў і пазіцый, атрымала агульную назvu задачы пучковай алтымізацыі (англ. **bundle adjustment**). Задача заключаецца ў мінімізацыі памылкі функцыянала, які задае суадносіны паміж мноствам кропак прасторы і праэкцыямі гэтых кропак. Строга гэта можа быць запісана як:

$$\min_{a_j, b_i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij} d(Q(a_j, b_i), x_{ij})^2 \quad (5)$$

дзе:

$n$  - колькасць кропак у трохмернай прасторы, якія бачныя хаця б на адным фотаздымку,

$m$  - колькасць выяваў (колькасць камер),

$x_{ij}$  - праэкцыя кропкі  $i$  на выяву  $j$ ,

$v_{ij}$  - дваічная зменная, якая вызначае, ці бачная кропка  $i$  на выяве  $j$ ,

$a_j$  - вектар параметраў камеры  $j$ ,

$b_i$  - набліжэнне для кропкі  $i$  прасторы,

$Q(a_j, b_i)$  - функцыя пошуку праэкцыі кропкі  $i$  на выяву  $j$ ,

$d(x, y)$  - Эўклідова адлегласць паміж кропкамі  $x$  і  $y$ .

Мінімізаваўшы памылку функцыянала, мы знайдзем найлепшае магчымае набліжэнне для параметраў камераў  $a_j$  і кропак трохмернай прасторы  $b_i$ , што дасць нам магчымасць зрабіць візуалізацыю мадэлі, што і з'яўляецца нашай мэтай.

Вышэй, у формулах (1) - (3) мы ўжо разгледзелі, што ўяўляе сабой функцыя пошуку праэкцыі  $Q(a_j, b_i)$ .

Дадзеная задача можа рашацца як агульнымі падыходамі да мінімізацыі функцыяналу, так і спецыяльна распрацаванымі алгарытмамі, якія ўлічваюць разрэджаную структуру матрыцы, якая апісвае функцыянал, такім чынам эфектыўна рашаючы задачу пучковай алтымізацыі. Алгарытмам, які атрымаў найбольшы распаўсюд пры практычнай реалізацыі, з'яўляецца алгарытм Левенберга-Марквардта

(англ. Levenberg–Marquardt algorithm, LMA). Гэта ітэратыўны алгарытм рашэння задачы мінімізацыі нелінейнага функцыянала спосабам найменшых квадратаў (англ. non-linear least squares problem).

## Асаблівасці задачы рэканструкцыі па дадзеных з беспілотных лятальных апаратуў

Той факт, што рэканструкцыя адбываецца не на выпадковым наборы дадзеных, пра які ніяма ніякай дадатковай інфармацыі, дае нам прастору для аптымізацыі працэса рэканструкцыі: скарачэння часу і паляпшэння якасці пабудаванай мадэлі. Пералічым асаблівасці нашай задачы ў пераўнанні з агульной задачай:

- Усе здымкі зробленыя адной фізічнай камерай, такім чынам унутраныя параметры ўсіх камераў застаюцца нязменнымі. Больш за тое, унутраныя камеры параметры застаюцца нязменнымі не толькі ў межах аднаго набора, але і для ўсіх здымкаў зробленым адным БПЛА з фіксаванай на ім камерай. Гэты факт не ўносіць зменаў у працэс рэканструкцыі, але спрашчае працэс карыстання БЛПА на практицы (адсутнасць патрэбы ў шторазовым калібраванні для высвятлення ўнутраных параметраў камеры).
- Апроч камеры ў нашым распаряджэнні, у залежнасці ад канфігурацыі БПЛА, могуць мецца і іншыя датчыкі: акселерометр, гіраскоп, GPS-датчык і інш. Дадзеная сабраная імі, могуць выкарыстоўвацца як для вызначэння вонкавых параметраў камеры, так і для папярэдняга размяшчэння крапак у прасторы.

## Змены ў набор дадзеных і алгарытмы з улікам вышэйсказанага

Прычыны, па якіх дадатковыя дадзенныя станоўча паўплываюць на якасць і хуткасць рэканструкцыі, абсалютна натуральныя: памяншэнне колькасці параметраў і больш якасная пачатковая апраксімацыя. Такім чынам мы маем два падыходы да выкарыстання дадзеных, якімі супраджаеца набор выявай:

- Аб'яўленне параметраў канстантнымі і непасрэднай іх падстаноўка ва ўраўненні - такім чынам, маем яўнае памяншэнне колькасці параметраў што не можа не паўплываць на хуткасць адпрацоўкі алгарытма і на выніковае значэнне памылкі праэкцыі станоўча. Відавочны і недахоп: немагчымасць дакладнага задання параметраў і наступнае аб'яўленне іх канстантнымі прывядзе да псовання канчатковых значэнняў трохмерных крапак і, адпаведна, пагаршэння якасці пабудаванай мадэлі. Дакладнасць вызначэння

параметраў знаходзіцца ў простай залежнасці ад карэктнасці пабудаванай мадэлі. На практыцы высвятляеца, што такі падыход вядзе да значнага пагаршэння канчатковых вынікаў і кепска прымяняльны на рэальных дадзеных.

- Выкарыстанне дадатковых дадзеных для пачатковай апраксімацыі значэнняў параметраў камеры і палажэнняў кропак у просторы. Пры такім падыходзе, мы не рызыкуем стаць ахвярамі кепскай дакладнасці альбо памылак у апісанні дадзеных - разам з тым, колькасць ітэрацый у працэсе пучковай аптымізацыі можа паменшыцца ў разы. Гэты падыход можа паспяхова быць прыменены на практыцы: хуткасць працэса пабудовы праста залежыць ад якасці ўваходных дадзеных - яўных жа памылак у выніковай мадэлі (такіх, як у першым пункце) назірацца не будзе, праз тое, што алгарытм выправіць яўна хібныя ўваходныя дадзеняя.

Альтэрнатывай можа стаць змяшаны падыход: напрыклад, аб'явіць фокусную адлегласць пастаяннай і недаступнай да зменаў (калі мы дастаткова ўпэўненыя ў лічбах, якія прадастаўляе вытворца камера, альбо атрыманых у выніку каліброўцы), але дазволіць алгарытму удакладняць параметры павароту камеры - пры дастаткова дакладных пачатковых значэннях яны будуць змененныя нязначна.

# Практычна рэалізацыя

Практычна рэалізацыя, у майм выпадку, складалася з напісання невялікіх праграмаў для адпрацоўкі асобных этапаў рэканструкцыі (такіх як пошук ключавых крапак), а таксама унісення зменаў і эксперыменты над ужо існуючымі распрацоўкамі ў галіне кампьютарнага зроку і задачы рэканструкцыі дадзеных, атрыманых з беспілотных лятальных апаратоў.

Мэтай курсавога праекта не была рэалізацыя алгарытмаў пошуку ключавых крапак і пошуку адпаведнасцяў паміж імі. Гэтыя алгарытмы рэалізаваныя шматразова у разнастайных выглідах і ў складзе розных бібліятэк - напрыклад, OpenCV - найбольш распаўсюджанай бібліятэкай, якая рэалізуе алгарытмы кампьютарнага зроку.

## Рэалізацыя фармата файла дадатковых дадзеных

Дадзеная пра адпаведнасці паміж крапкамі на розных выявах мы атрымалі ў выніку аперацый feature extraction і feature matching, прыклады рэалізацыі якіх прыведзены ў папярэдніх пунктах.

Вызначым фармат файла, які будзем перадаваць праграме разам з наборам выяваў і які будзе структуравана захоўваць дадзеная з іншых датчыкаў на беспілотным лятальным апарате (вонкавы GPS-датчык, акселерометр і інш.).

Патрабаванні да фармата файла будуць наступныя:

- У файле мусіць быць апісаная фізічная камера, пры дапамозе якой быў падрыхтаваны адпаведны набор выяваў. Камера задаецца з дапамогай пяці параметраў: фокуснай адлегласці, зрушенні цэнтра праекцыі адносна крапкі праламлення і два каэфіцыэнта радыяльнай дэфармацыі. Маєм радок параметраў  $f, cx, cy, k1, k2$ . Нагадаем, што унутраныя параметры камеры агульныя для кожнай "віртуальнай" камеры бо мяркуеца, што ўвесь набор дадзеных падрыхтаваны адной фізічнай камерай.
- Наступным радком апісьваем колькасць выяваў у наборы дадзеных. Маєм параметр `num_images`.
- Далей будзе ісці апісанне кожнай выявы з выкарыстаннем яе імя, кватэрніона  $q$ , якому адпавядае вектар даўжыні 4 і які апісвае паварот камеры ў прасторы, а таксама вектара  $t$  даўжыні 3, які апісвае зрушэнне камеры ў прасторы адносна вызначанай крапкі. Вектар  $t$  можа з'яўляцца геаграфічнымі каардынатамі крапкі ў прасторы, альбо апісьваеться адносна становішча крапак іншым чынам.

Маем наступны фармат файла:

```
<f> <cx> <cy> <k1> <k2>
<num_images>
<image_name_0> <4d q vector> <3d t vector (lat, lon, alt)>
...
<image_name_num_images> ...
```

Ніжэй прыведзены прыклад файла:

```
2775.27 1600.0 1200.0 0.1 0.1
4
IMG_1190.JPG 0.093 -0.011 0.167 0.981 0.671 -1.171 0.316
IMG_1191.JPG 0.017 -0.019 0.122 0.992 0.611 0.301 -0.201
IMG_1192.JPG -0.058 0.015 0.085 0.994 0.062 1.951 -0.136
IMG_1193.JPG 0.058 -0.082 -0.009 0.994 1.447 3.954 0.290
```

Што ж тычыцца праграмы, то ў ёй быў рэалізаваны спецыяльны клас з метадамі чытання і апрацоўкі дадзеных з файла. Аб'ект такога класа уключае ў алгарытм і прадстаўляе прости доступ да дадзеных апісаных вышэй. Апроч іншага, гэты клас суадносіць выявы, апісаныя ў файле з выявамі з базы дадзеных, робіць высновы, наколькі поўна апісаны файл у параштукі са змесцівам базы.

## Кантроль над алгарытмам

Найбольшую цікаўнасць для нас прадстаўляе ўплыў наяўнасці дадатковых дадзеных на хуткасць працы алгарытма і на якасць атрыманай мадэлі. Сутнасць запуску серыі эксперыменту заключалася ў запуску алгарытма з рознымі канфігурацыямі і параштукі вынікаў. У рэалізацыю алгарытма рэканструкцыі я дадаў некалькі дадатковых сцягоў (індыкатараў), які задаюць канфігурацыю алгарытма. Такім чынам канфігураваць алгарытм стала магчымым праз наступныя параметры:

- `use_drone_data` - вызначае, ці выкарыстоўваць (ці чытаць наогул) дадзеная з вызначанага намі вышэй файла.
- `use_qvec_tvec_estimations` - вызначае, ці выкарыстоўваць у алгарытме дадзеная, якія апісываюць паварот і зрушэнне камеры для кожнай асобна ўзятай выявы. Такім чынам, гэты сцяг указывае, ці выкарыстоўваць усе дадзеная, ці абмежавацца унутранымі параметрамі камеры. Ігнаруе ща, калі не паставлены `use_drone_data`.

- `refine_focal_length` - калі выстаўлены, то пры запуску алгарытма фокусная адлегласць апраксімуеца вызначанымі намі значэннямі, але ў ходзе ітэратыўнага выканання алгарытма значэнні могуць мяняцца для мінімізацыі памылкі. У процілеглым выпадку значэнні фіксаваныя, і фокусная адлегласць выступае ў якасці канстанты, а не параметра, які можа быць удакладнены ў працэсе выканання алгарытма.
- `refine_principal_point` - гэты параметр выконвае ролю падобную да той, што адведзена `refine_focal_length`, але ў сваю чаргу адказвае за згаданыя вышэй унутраныя параметры `sx`, `su` камеры. Звычайны гэта сцяг выстаўляеца на `false`, бо для большасці камер параметры `sx`, `su` могуць быць дакладна вызначаныя як `sx = (шырыня выявы) / 2`, `su = (вышыня выявы) / 2` (задаюцца ў пікселях).
- `refine_extra_params` - адказвае за паводзіны адносна параметраў радыяльной дэфармацыі: алгарытм спрабуе палепшыць іх, калі сцяг выстаўлены, і пакідае пастаяннымі ў адваротным выпадку.

Варыруя значэнні сцягоў, вызначаных вышэй, будзем атрымліваеца розныя паводзіны алгарытма. Гэтыя паводзіны мы і будзем аналізаваць.

## Серый эксперыменту

Эксперимент будзе прадстаўляць сабой набор дадзеных, на якім будуць запускацца розныя канфігурацыі алгарытма. Вынікамі запуску алгарытма будзем лічыць час, за які ён адпрацувае, а таксама якасць пабудаванай мадэлі. Якасць мадэлі будзем ацэньваць колькасцю кропак, якія ў выніку былі ў яе дададзеныя, наяўнасцю ці адсутнасцю выкідаў, шчыльнасцю воблака кропак, а таксама досыць суб'ектыўнымі ацэнкамі, такімі як вонкавы выгляд мадэлі і вонкавае падабенства да мадэляў, пабудаваных з іншымі канфігурацыямі алгарытма.

У абодвух апісаных ніжэй эксперыментах выкарыстоўваеца адноўкавы набор выяваў і адпаведных ім параметраў - розніца ў памерах набораў. Усе запускі адбываліся на камп'ютары з адноўкавай канфігурацыяй, нагрузкa ад зневідных працэсаў на працэсар была сведеная да мінімума.

## Эксперимент на маленьком наборы дадзеных

У гэтым эксперыменце ў якасці дадзеных былі ўзятыя **16** выяваў са згаданага вышэй набора. Пошук ключавых кропак адпрацаваў за **0.79 хвіліны**, пошук адпаведнасцяў - за **1.19 хвіліны**. Вынікі запускаў прыведзены ў табліцы 1.

	use drone data	use qvec tvec estim.	refine focal length	refine princ. point	refine extra params	Час (хвілін)	Вынікі
1	0	0	1	0	1	0.52	Стандартны запуск алгарытма без выкарыстання вонкавых дадзеных. Атрымалі мадэль на 8.6k кропак.
2	1	0	0	0	1	0.45	Аб'яўленне фокуснай адлегласці канстантнай велічынёй. Пабудавалася мадэль на 4k кропак. Заўважная параза ў якасці і невялікае паскарэнне.
3	1	1	0	0	1	0.29	Аб'яўленне ўсіх вонкавых дадзеных канстантнымі. Мадэль на 5.6k кропак з візуальна парабональнай якасцю і значным прыростам у часе.

Табліца 1: вынікі эксперыменту на малым наборы дадзеных

### Эксперымент на вялікім наборы дадзеных

**127** выявав (пашыраная версія таго ж набора). Пошук ключавых кропак за **2.11** хвіліны і пошук адпаведнасцяў за **43.59** хвілінаў. Вынікі - у табліцы 2.

	use drone data	use qvec tvec estim.	refine focal length	refine princ. point	refine extra params	Час (хвілін)	Вынікі
1	0	0	1	0	1	12.54	Запуск алгарытма са стандартнай канфігурацыяй. Атрыманая мадэль на 59k кропак.

Табліца 2: вынікі эксперыменту на вялікім наборы дадзеных

2	1	0	0	0	1	26.22	Жорсткае фіксаванне фокуснай адлегласці выглядае кепскай ідэй. Невытлумачальны рост часу і значнае пагаршэнне якасці мадэлі (22.8k кропак, візуальна на парадак горш за першы запуск).
3	1	1	0	0	1	7.68	Выкарыстанне ўсіх магчымых вонкавых дадзеных як пастаянных. Атрыманая мадэль на 46k кропак. Вонкава горш за першы запуск, але праз значна прырост па часе можа выступаць у якасці хуткай пабудовы "накіда" мадэлі.

Працяг табліцы 2

## Іншыя спосабы ацэнкі вынікаў

Ацэнка вынікаў экспериментаў - найважнейшая ягоная частка. У папярэднім пункце мы рабілі высновы, абапіраючыся ў асноўным на вонкавае параштуннне мадэляў, што не з'яўляецца строгай ацэнкай вынікаў працы. Для строгай і акуратнай ацэнкі вынікаў можна выкарыстаць наборы дадзеных, якія былі распрацаваныя спецыяльна для тэставання і ацэнкі эфектыўнасці алгарытмаў рэканструкцыі. Прыклад рэурса з такім наборамі дадзеных - па спасылцы <https://www.sensefly.com/drones/example-datasets.html>. Наборы дадзеных ідуць адразу разам з апісаннем вынікаў працы на іншых рэалізацыях алгарытмаў. Тэставанне і эксперементаванне з дапамогай такіх набораў уваходзіць у набліжэйшыя планы па працы над праектам.

## Высновы

Намі была апісаны тэарэтычны складнік ўсіх этапаў пабудовы разрэджанага воблака кропак на аснове набора выяваў; паказаныя адрозненні ў рэалізацыі агульной задачы рэканструкцыі ад задачы з дадатковымі дадзенымі; прыведзеная магчымая рэалізацыя фармату файла з апісаннем дадзеных; праведзеная серыя эксперыментаў з мэтай вызначэння, ці дае прырост у хуткасці і якасці мадыфікаваная версія алгарытма.

На практыцы, выкарыстанне мадыфікаванай версіі алгарытма будзе азначаць наступнае: набор уваходных дадзеных змяшчае апроч выяваў файл з дадатковымі дадзенымі, якія мусіць быць папярэдне запісаныя ў яго ў адпаведным фармаце. Такім чынам у працэс апрацоўкі дадзеных пасля палёту дадаецца дадатковы этап, які патрабуе распрацоўкі дадатковага праграмнага забеспечэння.

Апроч варыяцый з ўваходнымі дадзенымі, магчымымі шляхам аптымізацыі працэса пабудовы мадэлі паверхні з'яўляюцца:

- рэалізацыя алгарытма альбо ягоных крытычных частак на GPU замест CPU;
- распаралельванне ўсіх этапаў решэння задачы;
- іншыя спосабы аптымізацыі з выкарыстаннем асаблівасцяў апаратнага забеспечэння;
- рэалізацыя пабудовы спрошчанай і набліжанай да сапраўднай мадэлі паверхні, якая можа запускацца перад запускам паўнавартаснай рэканструкцыі і выкарыстоўвацца для папярэдняй ацэнкі карыстачом праграмы мясцовасці, масштабаў, узаемнага размяшчэння аб'ектаў на мадэлі.

Прапанаваныя вышэй падыходы складуць аснову маёй далейшай працы над задачай рэканструкцыі паверхні па здымках з беспілотных лятальных апаратоў.

## Спіс кръніцаў

1. D. G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. IJCV, 2004.
2. OpenCV Documentation: Introduction to SIFT (Scale-Invariant Feature Transform)
3. Shawn McCann. 3D Reconstruction from Multiple Images.
4. Camera Models and Imaging. Leow Wee Kheng. CS4243 Computer Vision and Pattern Recognition.
5. Ceres Solver (library) implementation of bundle adjustment problem.  
[http://ceres-solver.org/nlsl\\_tutorial.html](http://ceres-solver.org/nlsl_tutorial.html)
6. Sameer Agarwal, Noah Snavely, Steven M. Seitz, and Richard Szeliski. Bundle Adjustment in the Large.  
<http://grail.cs.washington.edu/projects/bal/bal.pdf>