МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра комп'ютерної фізики

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Виявлення симетрій в графічних образах і реконструкція 3-D об'єктів»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-64
Вєрушкін І.О.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: комп'ютерна фізика
Керівник: к.т.н., доцент Лісін Д.О.

Рецензент:

Харків – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра комп'ютерної фізики
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Костянтин НЕМЧЕНКО
підпис

"____"_____2020 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Вєрушкін Іван Олексійович

1.Тема роботи «Виявлення симетрій в графічних образах і реконструкція 3-D об'єктів» керівник роботи: Лісін Денис Олександрович, кандидат технічних наук.

затверджені наказом по університету від "10" квітня 2020 року №0210-05/513

2. Строк подання студентом роботи 12.05.2020

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1) Провести аналіз різних підходів для реконструкції тривимірної поверхні з двовимірних зображень;

2) Вибрати та адаптувати алгоритм реконструкції;

3) Ознайомитися із групами гомографій

4) Розробити програмне забезпечення для реконструкції тривимірної поверхні;

5) Провести тестування розробленого програмного забезпечення.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми, узгодження, а також затвердження її на кафедрі
2	Робота над літературою та іншими джерелами
3	Затвердження теми на кафедрі
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5.Дата видачі завдання

Студент _____ Вєрушкін Іван
підпис

Керівник роботи _____ Лісін Денис Олександрович
підпис

РЕФЕРАТ

Вєрушкін І.О. Виявлення симетрій в графічних образах і реконструкція 3-D об'єктів.

Дипломна робота представлена на 41 сторінці; складається з вступу, 3 розділів та висновків; містить 15 рисунків, список використаної літератури з 35 найменувань.

Мета даної роботи – розробка і програмна реалізація методу відтворення тривимірної моделі об’єкту на основі одного або декількох двовимірних зображень цього об’єкту із використанням сегментації цих двовимірних зображень шляхом створення ієрархії нових геометричних примітивів, тривимірна структура та положення камери для яких повністю відтворені.

Об’єктом даної роботи є двовимірні зображення, у яких «схована» тривимірна інформація про геометричну форму об’єкта.

Предмет роботи – реконструкція та візуалізація тривимірної поверхні з одного або декількох двовимірних зображень.

В останні роки все частіше привертає увагу вчених використання симетрій у двовимірних зображеннях для реконструкції тривимірних об’єктів. Такого роду реконструкції необхідні у багатьох областях науки та техніки, таких як зворотне проектування, виробництво, архітектура і т.д. Використання властивостей симетрій дозволяє значно скоротити об’єм оперативної пам’яті, що використовується під час інтерполяції, а також дозволяє спростити алгоритм реконструкції та зробити його більш ефективним. З цих причин, реалізація алгоритму відтворення тривимірних об’єктів з двовимірних зображень із використанням симетричних властивостей зображень є задачею актуальною та затребуваною.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СТРУКТУРА З СИМЕТРІЇ; ГРУПА СИМЕТРІЇ; ГОМОГРАФІЧНА ГРУПА; ВІДПОВІДНІСТЬ НА ОСНОВІ СИМЕТРІЇ; 3-D РЕКОНСТРУКЦІЯ

РЕФЕРАТ

Верушкин И.А. Выявление симметрий в графических образах и реконструкция 3-D объектов.

Дипломная работа представлена на 41 странице; состоит из введения, 3 глав и выводов; содержит 15 рисунков, список использованной литературы из 35 наименований.

Цель данной работы - разработка и программная реализация метода воспроизведения трехмерной модели объекта на основе одного или нескольких двумерных изображений этого объекта с использованием сегментации этих двумерных изображений путем создания иерархии новых геометрических примитивов, трехмерная структура и положение камеры для которых полностью воспроизведены.

Объектом данной работы является двумерные изображения, в которых «скрыта» трехмерная информация о геометрической форме объекта.

Предмет работы - реконструкция и визуализация трехмерной поверхности с одного или нескольких двумерных изображений.

В последние годы все чаще привлекает внимание ученых использование симметрий в двумерных изображениях для реконструкции трехмерных объектов. Такого рода реконструкции необходимы во многих областях науки и техники, таких как обратное проектирование, производство, архитектура и т.д. Использование свойств симметрии позволяет значительно сократить объем оперативной памяти, используемой при интерполяции, а также позволяет упростить алгоритм реконструкции и сделать его более эффективным. По этим причинам, реализация алгоритма воспроизведения трехмерных объектов с двумерных изображений использованием симметричных свойств изображений является задачей актуальной и востребованной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СТРУКТУРА ИЗ СИММЕТРИИ; ГРУППА СИММЕТРИИ; ГОМОГРАФИЧЕСКАЯ ГРУППА; СООТВЕТСТВИЕ НА ОСНОВЕ СИММЕТРИИ; 3-D РЕКОНСТРУКЦИЯ

ABSTRACT

Verushkin I.O. Symmetry detection in graphical images and reconstruction of 3-D objects.

The thesis is presented on 41 pages; consists of introduction, 3 sections and conclusions; contains 15 figures, a list of used literature of 35 titles.

The purpose of this work is to develop and implement a method of reproducing a three-dimensional model of an object based on one or more two-dimensional images of this object using the segmentation of these two-dimensional images by creating a hierarchy of new geometric primitives, three-dimensional structure and position of the camera for which are fully reproduced.

The object of this work is two-dimensional images in which three-dimensional information about the geometric shape of the object is hidden.

The subject of the work is the reconstruction and visualization of a three-dimensional surface from one or more two-dimensional images.

In recent years, scientists have been increasingly attracted to the use of symmetries in two-dimensional images to reconstruct three-dimensional objects. This kind of reconstruction is needed in many fields of science and technology, such as reverse engineering, manufacturing, architecture, etc. Using symmetry properties can greatly reduce the amount of RAM used during interpolation, as well as simplify the reconstruction algorithm and make it more efficient. For this reason, the implementation of the algorithm of reconstruction of three-dimensional objects from two-dimensional images with the use of symmetrical properties of the images is an actual and relevant task.

KEYWORDS: STRUCTURE FROM SYMMETRY; SYMMETRY GROUPS; HOMOGRAPHIC GROUPS; SYMMETRY-BASED MATCHING; 3-D RECONSTRUCTION

ЗМІСТ

ВСТУП 9
1. АЛГОРИТМИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТРИВИМІРНИХ ПОВЕРХОНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СИМЕТРІЇ 12
1.1. Структура із симетрії 14
1.2. Попередні дослідження 15
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ 17
2.1. Планарна симетрія та її групове представлення 17
2.2. Група гомографії в перспективному зображенні. 19
2.3. Ієрархічна сегментація зображень на основі симетрії. 22
2.4. Ієрархія симетрії середнього рівня: геометрична сегментація 26
2.5. 3-D узгодження із зображеннями симетричних структур. Реконструкція з двох видів однієї комірки. 29
2.6. Декілька кадрів для декілька клітинок симетрії. 30
2.7. Відповідність зображень 31
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ. 33
3.1. Виділення симетричних клітинок 33
3.2. Автоматична відповідність клітинок 35
3.3. Напівавтоматична реконструкція сцени 36
ВИСНОВКИ 38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 39

ВСТУП

Однією з головних цілей розробок у галузі комп’ютерного зору є реконструкція тривимірних моделей сцен і предметів з двовимірних зображень. 3D-реконструкція має застосування в таких різних сферах, як робототехніка, архітектурні зйомки, стиснення відео, криміналістика та нейрохірургія.

Процес реконструкції є важким, оскільки під час проекції на плоский образ втрачається багато свідоцтв про тривимірність природи, що спостерігається. Однак інформація лежить в кодованому зображенні на зображенні перспективи, завдяки чому об'єкти подалі виглядають менше. Щоб відновити повну 3D-структуру, це спотворення потрібно правильно моделювати, що в типових програмах вимагає знання положення та об'єктива камери.

3D-реконструкція - давня погано обумовлена проблема, яку десятиліттями досліджували спільноти, які займаються комп'ютерним зором, комп'ютерною графікою та машинним навчанням.

Мета 3D-реконструкції на основі зображень - зробити висновок про тривимірну геометрію та структуру об'єктів і сцен з одного або декількох двовимірних зображень. Ця давно поставлена проблема є основоположною для багатьох застосувань, таких як навігація роботів, розпізнавання об'єктів та розуміння сцен, 3D-моделювання та анімація, промисловий контроль та медична діагностика. Відновлення втраченого виміру лише за допомогою 2D-зображень було метою класичних багатовидових стерео-методів та методів shape-from-X, які були широко досліджені протягом багатьох десятиліть. Перше покоління методів підійшло до проблеми з геометричної точки зору; вони зосереджувались на розумінні та формалізації, математично, процесу проектування з 3D у 2D з метою розробки математичних чи алгоритмічних рішень погано обумовленої оберненої задачі. Ефективні рішення, як правило,

вимагають декількох зображень, знятих за допомогою точно відкаліброваних камер. Наприклад, на основі стерео-методів потрібні відповідність зображень, знятих із дещо різних кутів огляду, а потім використовується принцип триангуляції для відновлення тривимірних координат пікселів зображення. Методи «форми з силуету» вимагають точно сегментованих 2D-силуетів. Ці методи, що призвели до розумної якісної 3D-реконструкції, вимагають декількох зображень одного і того ж об'єкта, знятих добре відкаліброваними камерами. Однак це може бути не практичним чи здійсненним у багатьох ситуаціях. Цікаво, що люди добре вирішують такі погано обумовлені зворотні проблеми, використовуючи попередні знання. Вони можуть визначити приблизний розмір і грубу геометрію предметів, використовуючи лише одне око. Вони навіть можуть здогадатися, як це виглядатиме з іншого погляду. Ми можемо це зробити, тому що всі раніше бачені об’єкти та сцени дозволили нам набути попередніх знань та розвинути ментальні моделі того, як виглядають об'єкти. Друге покоління методів 3D-реконструкції намагалося використовувати ці попередні знання, формулюючи проблему 3D-реконструкції як проблему розпізнавання. Шлях глибоких методів навчання та, що ще важливіше, зростаюча доступність великих наборів даних для тренінгу, призвели до нового покоління методів, які здатні відновити 3D-геометрію та структуру об'єктів з одного або декількох RGB-зображень без складного процесу калібрування камери. Незважаючи на недавній час, ці методи продемонстрували захоплюючі та перспективні результати щодо різних завдань, пов'язаних із комп’ютерним зором та графікою.

Метою даної роботи є розробка і програмна реалізація методу відтворення тривимірної моделі об’єкту на основі одного або декількох двовимірних зображень цього об’єкту із використанням сегментації цих двовимірних зображень шляхом створення ієрархії нових геометричних примітивів, тривимірна структура та положення камери для яких повністю відтворені. Базисом для створення таких примітивів є симетричні об’єкти на

вхідних зображеннях, тобто об’єкти, які мають трансляційну або обертальну симетрію.

Завдання, які були вирішені для досягнення мети роботи:

- Створення технічного завдання;
- Проведення аналізу різних підходів для реконструкції тривимірної поверхні з двовимірних зображень;
- Вибір алгоритму реконструкції;
- Реалізація обраного алгоритму у середовищі MATLAB;
- Тестування програми.

Об’єктом даної роботи є двовимірні зображення, у яких «схована» тривимірна інформація про геометричну форму об’єкта.

Предмет роботи – реконструкція та візуалізація тривимірної поверхні з одного або декількох двовимірних зображень.

Актуальність: В останні роки все частіше привертає увагу вчених використання симетрій у двовимірних зображеннях для реконструкції тривимірних об’єктів. Такого роду реконструкції необхідні у багатьох областях науки та техніки, таких як зворотне проектування, виробництво, архітектура і т.д. Використання властивостей симетрій дозволяє значно скоротити об’єм оперативної пам’яті, що використовується під час інтерполяції, а також дозволяє спростити алгоритм реконструкції та зробити його більш ефективним. З цих причин, реалізація алгоритму відтворення тривимірних об’єктів з двовимірних зображень із використанням симетричних властивостей зображень є задачею актуальною та затребуваною.

1. АЛГОРИТМИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТРИВИМІРНИХ ПОВЕРХОНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СИМЕТРІЇ

Симетрія є важливим геометричним інструментом для тривимірної реконструкції з перспективних зображень. Алгоритми реконструкції тривимірної поверхні, що використовують симетрію вихідних зображень, зазвичай створюють деяку структуру двовимірних симетричних патернів у просторі із вихідних каліброваних зображень. Структура рівномірно охоплює всі три основні типи симетрії, тобто, відбиваючу, обертальну та поступальну, та заснована на систематичному вивченні гомографічних груп в зображенні, індукованих групами симетрії в просторі.

Реконструкція структур сцени та положень камер з одного або декількох зображень є фундаментальною проблемою в літературі з комп'ютерного зору. У найбільш відомих існуючих методах, структури сцени та пози камери реконструюються на основі виявлення структури з техніки руху (наприклад, [1]) шляхом використання геометричних співвідношень точкових і лінійних властивостей зображень, таких як епіполярне обмеження. Однак можна помітити, що люди мають надзвичайну здатність виводити 3-D інформацію навіть з одинарних 2-D перспективних зображень, що говорить про існування інших, ймовірно, більш ефективних способів отримання геометричної інформації з перспективних зображень. Наприклад, на рис. 1.1 люди можуть без особливих зусиль знайти найбільш вірогідні 3-D інтерпретації для перших двох зображень. Ретельне зусилля для створення «регулярного» 2-D перспективного зображення з нерегулярними 3-D структурами створює відому ілюзію кімнати Еймса на рис. 1.1.

Це спостереження ставить такі цікаві запитання: Які припущення роблять людину такою здатною та готовою отримувати тривимірну інформацію з єдиних перспективних зображень? Наскільки ми можемо використовувати ці припущення для реконструювання найважливішої 3-D

інформації, такої як структура сцени та позиція камери, лише з окремих зображень. У цій роботі розглядається обчислювальна основа для одного такого припущення.

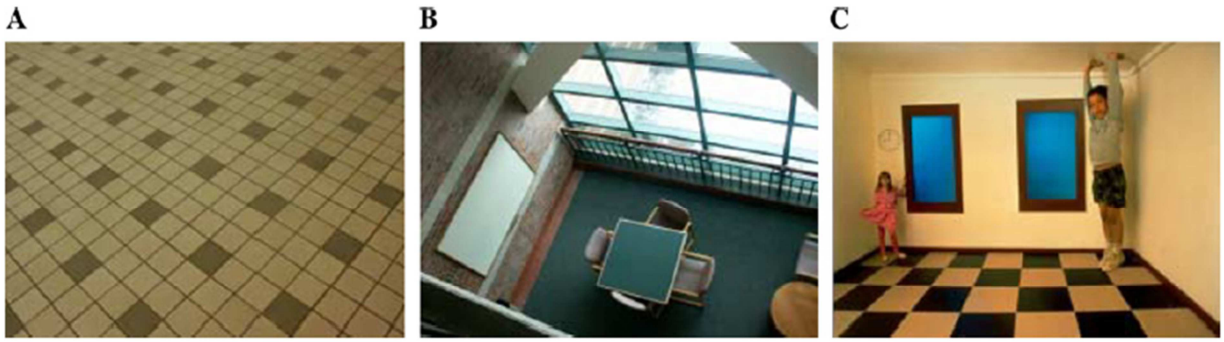


Рис. 1. Симетричні патерни та структури на фотографіях.

Значна частина «регулярності» у тривимірному просторі може бути охарактеризована математично поняттям симетрії. Наприклад, дві паралельні лінії в просторі трансляційно симетричні, людське обличчя є рефлексивно симетричним, а куб - і рефлексивно, і обертально симетричним. Якщо точки і лінії розглядаються як основні примітиви, які використовуються для моделювання довільної сцени, різні типи симетрії можуть розглядатися як примітиви високого рівня, які можна використовувати для моделювання різноманітних регулярних об'єктів і сцен, особливо в рукотворних навколишнх середовищах. Психологічна симетрія служить сильним підґрунтям для зорового сприйняття людини [2,3], її обчислювальні переваги також розглядаються у контексті комп'ютерного зору [4–7]. Однак все ще бракує об'єднаних зусиль, щоб продемонструвати, як усі види симетричних примітивів можна виявити, сегментувати та зіставити у перспективних зображеннях.

1.1. Структура із симетрії

Однією з основних труднощів для виведення 3-D інформації з одного 2-D зображення є те, що нескінченно багато структур у просторі може створювати абсолютно однакове перспективне зображення. Тому, щоб проблема була добре обумовлена, необхідно накласти додаткові припущення на місце події.

Як ми дізналися із загального дослідження взаємозв'язків між симетрією та багатократною геометрією [8], якщо об’єкт допускає достатньо велику симетрію, тривимірна геометрична інформація (включаючи структуру та позицію) не втрачається через перспективну візуалізацію, за винятком коефіцієнта масштабування. Це служить самою основою для всього процесу реконструкції на основі симетрії. Однак у цій роботі нас більше цікавить зворотна проблема планарної симетрії: як автоматично виявляти та витягувати симетричні об'єкти з кожного зображення та надалі їх співставляти на кількох зображеннях. Як ми покажемо, успішне вилучення симетричних структур з окремих зображень покладається на взаємодію двох наступних принципів:

1. *Тестування гіпотез симетрії*. З огляду на регіон інтересу, в якій мірі можна стверджувати, що це може бути зображення предмета з певними типами симетрії в просторі? Відповідь на це запитання вимагає від нас зрозуміти, як симетрія локально кодується за допомогою перспективної візуалізації, щоб ми могли перевірити, чи всі геометричні відношення для дійсного зображення симетричного об'єкта виконуються та є послідовними. З цього ми виводимо принцип "тестування гіпотези симетрії".

2. *Тест на глобальну симетрію*. Тим не менш, область, яка проходить певні типи тестування локальної симетрії, не означає автоматично, що вона повинна бути зображенням симетричного об'єкта. Хоча кожна окрема плитка на Рис. 1 пройде будь-яку локальну перевірку як квадрат, те, що насправді робить інтерпретацію квадрата «беззаперечною», це той факт, що ця інтерпретація також є надзвичайно послідовною серед усіх плиток. Це

призводить до принципу «глобального тестування на симетрію», на який ми покладаємось, щоб надійно вивести 3-D структуру із зображень.

У зображенні тестування гіпотези локальної симетрії виключає всі регіони, які не можуть бути перспективною проекцією жодної симетричної структури, отже, надає правильну орієнтацію на регіони, які є кандидатами на симетричні структури і, таким чином, містять більш багату 3-D інформацію. Тестування глобальної симетрії несе глобальні обмеження симетричних структур, які дозволять усунути невідповідність між кількома регіонами-кандидатами, а також групують регіони, що містять однаковий тип симетрії та просторову орієнтацію.

1.2. Попередні дослідження

Було проведено багато досліджень щодо вилучення із зображень загальних особливостей або регіонів інтересу. Для загальної проблеми виявлення примітивів на зображені існують методи, засновані на примитивах, таких як точки [9] та лінії [10], та піксельні методи, такі як метод активних контурів [11,12] та метод сегментації регіонів [13–15]. Для випадків, коли шукані сегменти можна параметризувати, було розроблено декілька методик, наприклад, відоме перетворення Хоффа [16] та нелінійна оцінка параметрів [17]. З іншого боку, у [18–20] розробляється глобальна тема вилучення структури об'єкта з окремих зображень. Крім того, існують методи, які розглядають інші особливі види інваріантних структур з перспективних зображень [21–23].

Були вивчені різні випадки симетрії для розпізнавання та відновлення структур під перспективними, ортогональними та афінними перетвореннями. Було помічено, що симетрію, особливо рефлексивну (або двосторонню), можна використовувати для отримання тривимірної інформації. Mitsumoto та ін. [24] були одними з перших, хто вивчав, як реконструювати 3-D об’єкт за допомогою планарної симетрії на основі дзеркального зображення; Франсуа

та ін. [5] забезпечив більш повне вивчення світлорефлексивної симетрії; Веттер і Поджіо [25] довели, що для будь-якого відбиваючого симетричного 3-D об'єкта для розпізнавання достатньо одного не випадкового 2-D виду моделі; Забродський та Вайнсхолл [6] використовували припущення двосторонньої симетрії для поліпшення 3-D реконструкції з послідовностей зображень; та Забродський та ін. [26] дали хороший обзор щодо досліджень світлорефлексивної симетрії та обертальної симетрії в комп’ютерному зорі. У 3-D розпізнаванні об'єктів і позах, Ротвел та ін. [19] вказував, що припущення про рефлексивну симетрію також можна використовувати при побудові проективних інваріантів і для усування певних обмежень щодо відповідних точок. Для виявлення симетрії [4,27,28] представлені ефективні алгоритми пошуку осей рефлексивної симетрії у двовимірних зображеннях, Сонце та Шерра [29] вивчили виявлення рефлексивної симетрії у 3-D просторі та Забродський та ін.. [26] ввів так звану відстань симетрії для класифікації рефлексивної та обертової симетрії у 2-D та 3-D просторах (з деякими проникливими коментарями, наведеними в [30]). Glachet та ін. [31] займаються знаходженням розміщень загальних 2-D рефлексивних контурів у перспективному зображенні. Детальніше про 2-D та 3-D симетричну деформацію кривих та реконструкцію див. [32].

Про роль груп симетрії в комп'ютерному зорі, Лю та ін. [33] запропонував обчислювальну модель для виявлення та подання всіх 17 патернів Фріза за припущенням афінної проекції. Обмеження їх роботи полягає в тому, що зображення можна брати лише з фронтального виду, а повторювані візерунки повинні охоплювати більшу частину зображення, хоча певний рівень шуму можна допустити. Щодо вивчення симетрії в геометрії множинного виду, Манді та ін. [34] розвиває епіполярну геометрію для повторних подібних структур під трансляцією, обертанням, афінними та двосторонніми перетвореннями.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Планарна симетрія та її групове представлення

Спочатку визначимо, що таке симетрія для жорсткого тіла в 3-D просторі. Математично симетрія об'єкта зазвичай описується групою симетрії. Кожен елемент групи являє собою симетричне перетворення, під яким об'єкт є інваріантним.

Визначення 1. (Симетрична структура та її групова дія). Набір 3-D ознак (точок чи ліній) $S \subset R^3$називається симетричною структурою, якщо існує нетривіальна підгрупа *G* евклідової групи *E(3)*, яка діє на неї. Тобто, для будь-якого елемента $g \in G$, g визначає автоморфізм на S (тобто, взаємно однозначне відображення S на себе). Зокрема, ми маємо $G(S) = G^{-1}(S) = S$ для будь-якого $g \in G$.

Взагалі існує три типи симетрії для жорсткого тіла: рефлексивна симетрія, обертальна симетрія та трансляційна симетрія. Коли структура *S* знаходиться на площині *P*, то група симетрії *G* є заміною підгрупи 2-D евклідової групи *E(2)*. Якщо ми виберемо координатний базис *(x, y, z)*, прикріплений до структури *S* таким чином, що вісь *z* є нормальним вектором площини *P*, то будь-яка точка на площині визначається його *(x, y)* координатами. Використовуючи однорідне подання, будь-який елемент $g \in G$ може бути виражений як

$$g = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4x4}, \tag{2.1}$$

де $R \in \mathbb{R}^{3x3}$ є ортогональною матрицею, що представляє обертання або відображення на *xy*-площині, а $T \in \mathbb{R}^3$ - вектор для трансляції на площину *xy* з $z = 0$.

Приклад 1. (Група симетрії прямокутника). Група симетрії прямокутника на рис.2 може бути представлена наступними матрицями:

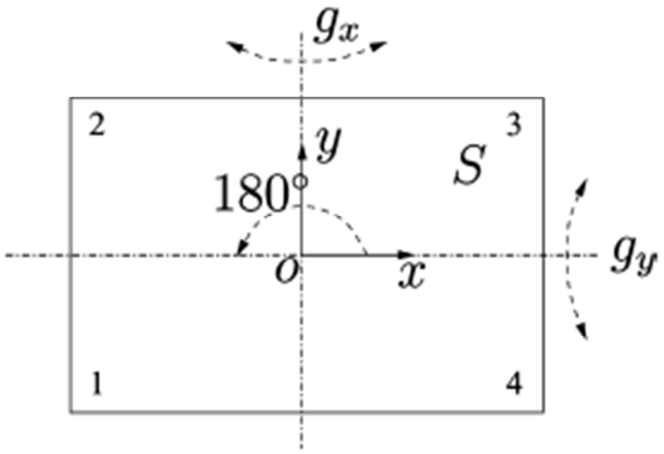


Рис. 2. Прямокутник, симетрія якого включає у себе рефлексію вздовж *x* та *y* та обертання навколо *o* на 180°

$$g_e = I_{4x4},\ g_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\ g_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$g_z = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де g_x та g_y відповідає рефлексії відносно осей *x* та *y*, а g_z – обертанню навколо осі z на 180°. Наприклад, результатом пермутації $g_x((1,2,3,4))$ є (4,3,2,1), що є точною відповідністю точок після дії g_x на прямокутник.

Елементи групи $G = \{g_e, g_x, g_y, g_z\}$ задовольняють співвідношенням групи: $g_x^2 = g_y^2 = g_z^2 = g_e,\ g_x g_y = g_y g_x = g_z,\ g_x g_z = g_z g_x = g_y,$ $g_y g_z = g_z g_y = g_x$.

Ці співвідношення будуть використані пізніше як критерії для тесту на локальну симетрію. Тільки ті регіони, які задовольняють цім груповим співвідношенням (якщо буде представлено гомографічне зображення, яке буде введено в наступному розділі), можуть розглядатися як кандидати плоских прямокутних структур для тестування на глобальну симетрію.

2.2. Група гомографії в перспективному зображенні.

Тепер розглянемо перспективне зображення планарного об'єкта *S*, знятого камерою в точці зйомки (або позиції) $g_0 = (R_0, T_0) \in SE(3)$ щодо границі об'єкта, де $R_0 \in SO(3)$ та $T_0 \in \mathbb{R}^3$. У цьому розділі буде показано, як представити відносини групи симетрії, описані в попередньому розділі, для перспективних зображень.

На Рис. 3 показаний прямокутник *S* на площині *P* і точка зору в g_0. Ми можемо позначити зображення як *I(S).* Оскільки прямокутник є рефлекторно симетричним, а g_x є відображенням по площині *yz*, то існує еквівалентна вигідна позиція *o'*, з якої ми отримаємо абсолютно те саме зображення *I (S)* після того, як g_x діє на S, і перетворення кадрів камери кадри від *o* до *o'* можуть бути представлені у вигляді $g_x{}'$.

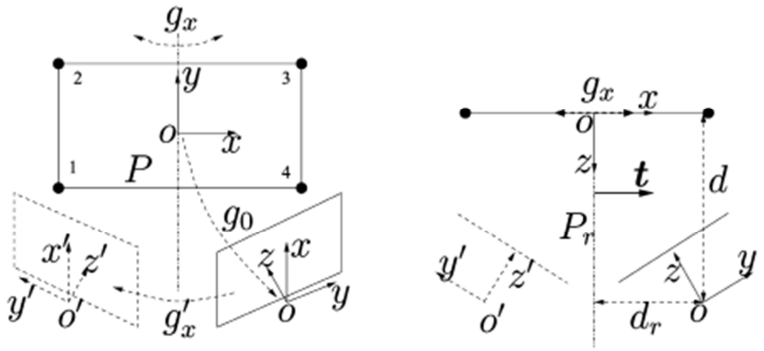


Рис. 3. Еквівалентні зображення прямокутника, до та після перетворення g_x.

Загалом, каліброване перспективне зображення ми знаємо під однорідними координатами

$$\lambda x = \Pi_0 g_0 X, \tag{2.2}$$

де $\Pi_0 = [I_{3x3}, 0]$ – матриця проекції , а g_0 – вигідна позиція. Після застосування перетворення симетрії $g \in G$, нове зображення нової точки gX, яка буде позначена як $g(x)$, задовольняє наступному рівнянню:

$$\lambda' g(x) = \Pi_0 g_0 (gX) = \Pi_0 (g_0 g g_0^{-1}) g_0 X. \tag{2.3}$$

Друга рівність виражає той факт, що зображення структури S залишиться тим самим, яке проектується з початкової точки X, якщо

зображення взято з точки зору, відмінної від вихідної на $(g_0 g g_0^{-1})$. Перетворення $(g_0 g g_0^{-1})$це саме дія g на S, виражена відносно координатного кадру камери.

Тоді група симетрії Gна площині P у просторі природно представлена його сполученою групою $G' = g_0 G g_0^{-1}$. G називається групою гомоморфії.

Приклад 2. (Гомографічна група прямокутника). Для випадку прямокутника із Приклада 1, гомографічна група $G' = g_0 G g_0^{-1}$ задана у вигляді $\{I, g_0 g_x g_0^{-1}, g_0 g_y g_0^{-1}, g_0 g_z g_0^{-1}\} = \{I, g'_x, g'_y, g'_z\}$, та її елементи задовольняють тому ж самому набору співвідношень як G у Прикладі 2, оскільки вони є ізоморфними:

$$g'^2_x = g'^2_y = g'^2_z = I, g'_x g'_y = g'_y g'_x = g'_z, g'_x g'_z = g'_z g'_x = g'_y,$$

$$g'_y g'_z = g'_z g'_y = g'_x.$$

З іншого боку, абиякий елемент $g' \in G'$є лінійною трансформацією в SE(3) із

$$g' = \begin{pmatrix} R' & T' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{4x4} \tag{2.4}$$

в однорідних координатах, де $R' \in \mathbb{R}^{3x3}$ це матриця повороту або рефлексивної симетрії, та $T' \in \mathbb{R}^3$ – матриця трансляції у тривимірному просторі. Таким чином, R' та T' можуть бути представлені наступним рівнянням:

$$\begin{pmatrix} R' & T' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_0 & T_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_0 & T_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1}, \tag{2.5}$$

що дає

$$\begin{cases} R' = R_0 R R_0^T, \\ T' = (I - R_0 R R_0^T) T_0 + R_0 T. \end{cases} \tag{2.6}$$

Нашою метою є відновити позицію симетричного малюнка - знайти R_0 і T_0, перетворення між структурою і камерою. Для того, щоб використовувати відношення, описане у рівнянні. (2.6), спочатку необхідно знати R' і T', і їх

можна знайти із співвідношення гомографії між двома площинами зображення стосовно двох кадрів камери в o і o'.

Оскільки S планарне, існує гомографічне відображення S_0, яке відображає площину $P \supseteq S$ у просторі у площину зображення із H_0, що визначається наступним чином:

$$H_0 = [R_0(1)\, R_0(2)\, T_0], \tag{2.7}$$

де $R_0(1)$ та $R_0(2)$ – перші два стовбці R_0. Для точки $X = [X, Y, Z]^T$ на об'єктній площині її координати на площині зображення визначаються як $g_0(X) = H_0 X$.

Більш того, симетрична дія $g \in SE(3)$ обмежена планарними обертанням та відображенням та може бути представлена відносно об'єктного кадру матрицею H розміром 3x3, хоча H не є гомографічною матрицею від об'єкту до камери у просторі.

Таким чином,

$$H = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3x3}, \tag{2.8}$$

де $R \in \mathbb{R}^{2x2}$ є матрицею відображення або обертання на площині xy та $T \in \mathbb{R}^2$. Отже, відображення або обертання точки на площині xy також може бути представлене в матричній формі у вигляді: $g(X) = HX$. Неважко помітити, що всі H с утворюють групу, ізоморфну G. Можна позначати g ~ H (у значенні ізоморфізм), а значить, G складається з усіх H матриць.

Зважаючи на симетрію S, для кожного $g \in G$, маємо $g(S) = H(S) = S$, і внаслідок цього

$$H_0(HX) = H_0 H H_0^{-1}(H_0(X)). \tag{2.9}$$

Гомографічна трансформація між двома площинами зображень відносно до двох кадрів камери може бути представлена як

$$H' = H_0 H H_0^{-1} \in \mathbb{R}^{3x3}. \tag{2.10}$$

Ми говоримо, що H_0- це перетворення гомографії двох зображень, викликане g_0, 3-D перетворення двох точок зору. Треба зауважити, що H_0 грає

роль відносної трансформації між реальним зображенням та еквівалентним "прихованим" видом. Це відношення проілюстровано на наступній схемі:

$$\begin{array}{ccc} S & \xrightarrow{g=H} & S \\ {\scriptstyle H_0}\downarrow & & \downarrow{\scriptstyle H_0} \\ I(S) & \xrightarrow{H'=H_0HH_0^{-1}} & I(S) \end{array} \tag{2.11}$$

Як і раніше, ми можемо позначити $g_0 = H_0$, а G’ - група, що складається з усіх матриць H_0. Отже, G’- кон'югована група G, тобто $G' = H_0GH_0^{-1}$. Тепер зрозуміло, що G0 як клас кон'югації насправді описує відносини гомографії між реальним зображенням та його прихованими аналогами, припускаючи, що площинна структура зазнає дії симетрії на площині об'єкта. Саме тому G’ називається гомографічною групою, що діє на зображення симетричної структури.

2.3. Ієрархічна сегментація зображень на основі симетрії.

Виходячи з теоретичних досліджень, які були наведені в попередніх розділах, тепер можливо показати, як це може допомогти сегментувати двовимірне зображення сцени з точки зору 3-D геометричної інформації, закодованої в ній. Метою є сегментація зображення на регіони, визначення регіонів, які потенційно мають послідовну інтерпретацію як симетричних об'єктів у просторі, та відновлення відносних тривимірних геометричних співвідношень між цими регіонами. Рис. 4 окреслює архітектуру прототипу системи, яку ми розробили для досягнення цих завдань. Ієрархічна архітектура складається з трьох основних рівнів.

У цьому розділі ми продемонструємо, як реалізувати вилучення клітин симетрії низького рівня та побудову ієрархії симетрії середнього рівня. Буде також запроваджений новий метод відповідності симетричних комірок на

декількох зображеннях як приклад програм високого рівня в наступному розділі.

Як відомо з попередньої глави, матриці гомографії, пов'язані з різними елементами симетрії в G, повинні зберігати однакові групові відносини. Крім того, кожна гомографія повинна призводити до тієї ж 3D реконструкції структури S. Це дуже важлива умова, і це призводить до наступного принципу.

Принцип 1 (Тестування гіпотези симетрії). Щоб перевірити, чи можна (частину) зображення інтерпретувати як об'єкт із групою симетрії G, нам необхідно перевірити для всіх елементів групи G, чи зберігають отримані матриці гомографії однакову групову структуру.

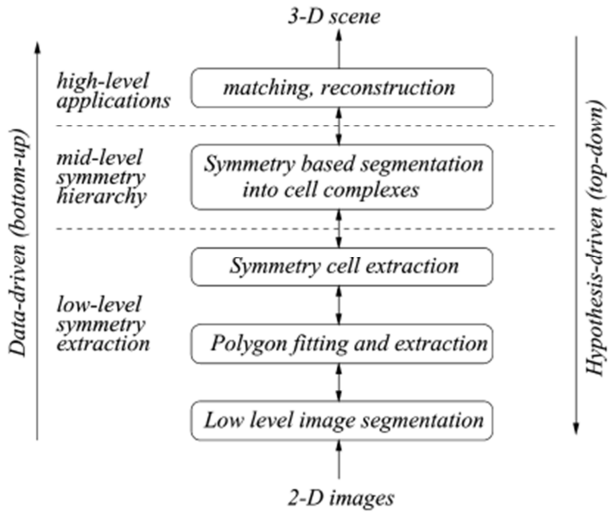


Рис. 4. Діаграма алгоритму ієрархічної сегментації зображень на основі симетрії.

Щоб «розпізнати» або «виявити» симетрію зображення, спершу вибираємо декілька областей-кандидатів зображення, які ми називаємо клітинками, і визначаємо, чи кожна клітинка проходить тестування певних типів локальних критеріїв симетрії. Наприклад, ми можемо вибрати будь-який набір чотирьох з’єднаних відрізків, які укладають у зображення однорідну область як клітинку. Він може відповідати 3-D чотирикутнику, який потрапляє в один з таких випадків: (1) несиметричний чотирикутник, (2) одна

рефлективна симетрія $G = Z_2$, (3) прямокутник ($G = D_4$) або (4) а квадрат ($G = D_8$). Використовуючи алгоритми, наведені в попередньому розділі, ми можемо протестувати клітинку на всіх чотирьох випадках і визначити, які типи симетрії ця клітина допускає. Якщо вона потрапляє до перших двох категорій, ми можемо його просто відкинути, оскільки ми не можемо відрізнити рішення з правильним припущенням відображення від рішення, яке має неправильні припущення, коли результати реконструкції несумісні. Тобто перші два випадки не відрізняються.

Клітина, що належить до будь-якої з двох інших категорій, має послідовні рішення для відновлення, і її називають осередком симетрії для чотирикутної області, на якому розміщений тип симетрії. Подібні визначення можуть застосовуватися до інших областей багатокутника з більш ніж 4 ребрами.

Щоб зробити пояснення інтуїтивним, ми будемо використовувати зображення, показане на Рис. 5, щоб продемонструвати процес роботи алгоритму. Далі будуть наведені інші приклади для більш загальних сцен.

Виділення полігону Для отримання областей-кандидатів для клітинок симетрії ми використовуємо алгоритм середнього зсуву на основі кольорів [14] для отримання однорідних областей кольорового малюнка із зображення. Два основних параметри алгоритму середнього зсуву встановлюються як $\sigma_S = 7, \sigma_R = 9$. Для кожної області, що перевищує мінімальний розмір, ми обчислюємо опуклу оболонку області, щоб гарантувати її опуклість та зменшити шум на її межі.

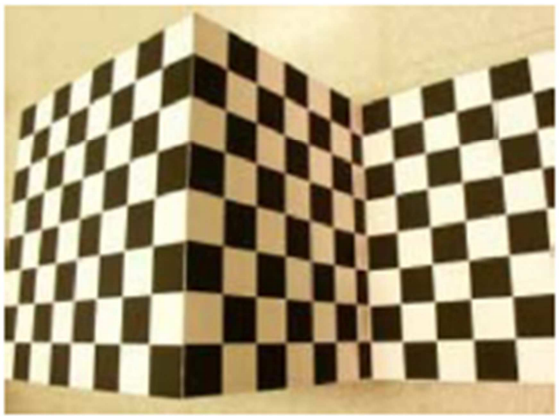


Рис.5. Зображення тривимірної шахової доски

Оскільки контур багатокутника складається з кускових лінійних відрізків як спеціальних кривих з нульовою постійною кривизною та кутів з локальними піками кривизни, було розроблено техніку підгонки багатокутника на основі критерію постійної кривизни, запропонованого в [36]. Результат для Рис. 5 показаний на Рис. 6. У порівнянні з вихідним зображенням деякі "клітинки" відсутні через шум. Тут треба ще раз зазначити, що загальний алгоритм не обмежується чотирикутниками, а насправді з критерію постійної кривизни ми безпосередньо знаємо, скільки ребер містить опукла область.

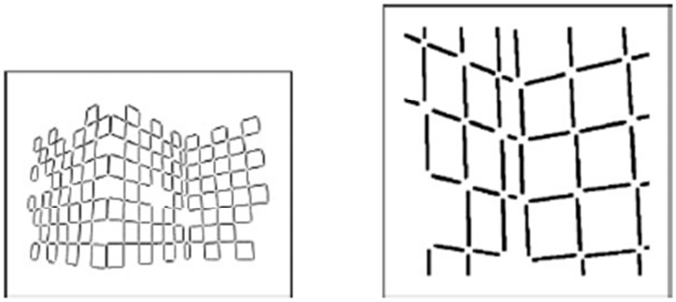


Рис.6. Результат виділення полігонів з Рис.5

Техніка опуклої оболонки плюс постійної кривизни не є ключовою для запропонованого алгоритму, її можна замінити будь-якими іншими методами згладжування границь та підгонки полігонів.

Тест на локальну симетрію. Для кожного витягнутого чотирикутника, використовуючи Принцип 1, ми можемо перевірити, чи відповідає він симетрії, наприклад, прямокутника чи квадрата.

На Рис.7 показані клітинки, витягнуті із зображення на Рис. 6, які проходять тестування як квадрати із прикріпленими до них об'єктними кадрами. Однак у довільних зображеннях нормальні вектори, отримані в результаті сегментації на цьому рівні, можуть бути зашумленими, як буде показано у подальших експериментах.

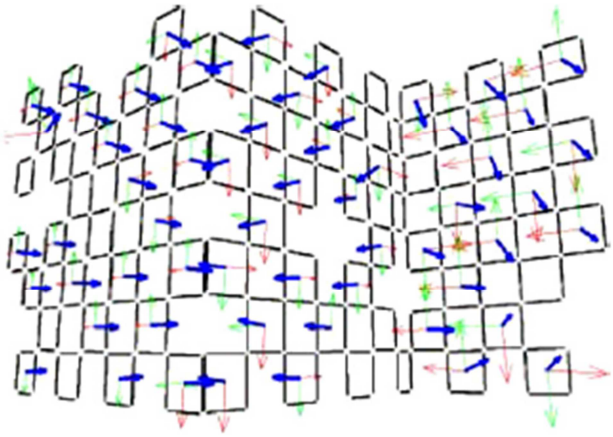


Рис.7. Клітини, які пройшли тест на локальну симетрію помічені векторами нормалей

2.4. Ієрархія симетрії середнього рівня: геометрична сегментація

Клітина, яка проходить тест на локальну симетрію прямокутника або квадрата, не обов'язково відповідає зображенню прямокутника або квадрата в просторі. Необхідно додатково перевірити обґрунтованість тесту у контексті всієї сцени. Для цього пропонується наступний принцип:

Принцип 2 (Глобальне тестування на симетрію). Клітини симетрії, які мають послідовні тривимірні геометричні властивості (наприклад, орієнтація) з іншими сусідніми клітинками, швидше за все, відповідають симетричним 3-D структурам у просторі.

Наприклад, якщо ряд сусідніх клітинок симетрії має взаємно узгоджені норми, цілком ймовірно, що ці клітини походять з однієї і тієї ж 3-D площини. Крім того, набір комірок разом може відповідати 3-D структурі, яка допускає нову симетрію на вищому рівні. Наприклад, дві сусідні комірки можуть бути поступальними копіями одна одної в просторі, що часто трапляється для вікон будівель. Це призводить до поняття комплексу симетрії: група (бажано сусідніх) клітин з послідовними тривимірними геометричними властивостями. Різні геометричні властивості можуть спричинити складну сегментацію симетрії різних типів. Ми розглядаємо три властивості як приклади: орієнтацію, топологію (зв’язність) та копланарність.

У нашій прототипній системі ми спочатку використовуємо алгоритм ISODATA [37] для кластеризації сферичних координат нормальних векторів отриманих планарних комірок симетрії. Далі ми пов'язуємо осередки симетрії за їх зв’язністю. Для двох комірок в одній групі орієнтації, якщо їх краї або кути примикають одна до одної, їх можна вважати "з'єднаними". Нарешті, для тих з'єднаних комірок з однаковими локальними відбиваючими і рефлексивними симетріями можна перевірити, чи є вони копланарними, розглядаючи поступальну симетрію серед них. Якщо дві клітини є копланарними і конгруентними, нормаль до площини, відновлена з поступальної гомографії між двома клітинами, повинна бути такою ж, як і нормалі обох клітин.

Колективне коригування. Копланарні клітини в межах однієї групи повинні розділяти дві речі: загальний нормальний вектор N та однакову відстань d від центру камери до їх опорної площини. Будемо вважати, що N є середнім серед усіх нормальних векторів у групі. Для кожної комірки в групі, обертання R її об'єктного кадру регулюється таким чином, щоб z-компонент дорівнював N. Потім трансляція T її об'єктного кадру масштабується таким чином, що $T^T N = d$. Таке коригування може значно покращити 3-D реконструкцію клітин у кожній групі. На Рис. 8 показаний результат, який

свідчить про те, що клітини симетрії, витягнуті з тестового зображення, набувають колективної корекції на основі їх копланарності.



Рис.8. Послідовні етапи роботи алгоритму.

Через вищезазначений процес сегментації кожне зображення породжує ієрархію клітин симетрії та комплексів, що нагадує деревоподібну структуру, як показано на Рис. 9. Можна розглядати таку деревоподібну ієрархію клітин і комплексів симетрії як $2\frac{1}{2} - D$ зображення. Хоча ієрархія ще не є повною реконструкцією всієї сцени, 3-D геометрична інформація про регіони сцени вже доступна, а відносини між цими регіонами також закодовані в межах ієрархії. Цей вид ієрархії також може бути використаний як орієнтир з окремих зображень для розподілу можливого положення камери в задачі одночасної локалізації та картографування (SLAM).

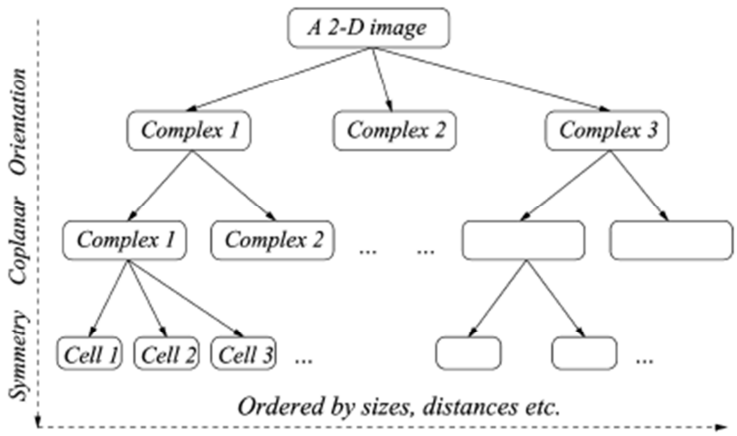


Рис.9. Ієрархічна сегментація зображення за тривимірними геометричними властивостями.

2.5. 3-D узгодження із зображеннями симетричних структур. Реконструкція з двох видів однієї комірки.

Почнемо з найпростішого випадку. Припустимо, подано два зображення однієї комірки, як показано на Рис. 10. Для i = 1,2 положення (R_i, T_i) i-го кадру камери щодо об'єктного кадру прямокутника можна визначити окремо за допомогою методу, наведеного вище. Однак реконструйовані T_i прийняли різні розміри. Причиною цієї різниці є те, що для кожного зображення відстань d_i від i-ї камери до опорної площини прямокутника була встановлена на рівні $d_i = 1$ для фіксації невідомої відстані в трансляції.

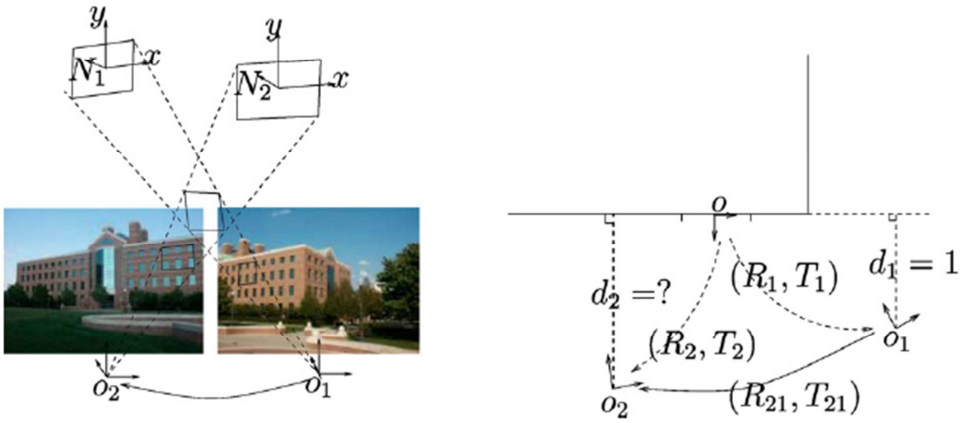


Рис. 10. Випадок одного прямокутника на різних зображеннях.

Припустимо, що чотири кути клітини, відновлені з першого зображення, мають координати $(x_j, y_j)^T$, а ті, що мають друге зображення, мають координати $(u_j, v_j)^T$, j = 1,2,3,4. Через різницю прийнятих шкал відновлені координати відповідних точок відрізняються однаковим співвідношенням. Оскільки відповідні точки фізично є однаковими, відношення $\alpha = \frac{d_1}{d_2}$ можна знайти через

$$\begin{bmatrix} x_j & -\bar{x} \\ y_j & -\bar{y} \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} u_j & -\bar{u} \\ v_j & -\bar{v} \end{bmatrix}, j = 1,2,3,4 \qquad (2.12)$$

де $\bar{x} = \frac{1}{4}\sum_{j=1}^{4} x_j$ і аналогічно для $\bar{y}$, $\bar{u}$ і $\bar{v}$. За наявності шуму, α можна легко обчислити, використовуючи метод найменшої площі. Отже, якщо перше

зображення обрано як опорне зображення, то відносною позицією другого кадру камери щодо канонічного кадру об’єкту стає (R_2, T_2) ‹(R_2, αT_2), а відстань від другого кадру камери до опорної площини прямокутника $d_2 = \alpha$.

2.6. Декілька кадрів для декілька клітинок симетрії.

Спершу розглянемо m перспективних зображень $I_i(S)$ клітини симетрії S, знятих з точки зору $(R_i, T_i) \in SE(3)$, i = 1,2,. . . , m. Для кожного (R_i, T_i) існує гомографія $H_i = [R_i(1), R_i(2), T_i] \in \mathbb{R}^{3x3}$, яка відображає площину $P \supseteq S$ у просторі до і-ї площини зображення. Гомографія між і-м і j-м зображенням позначається $H_{ij} = H_j H_i^{-1}$. Ми також позначаємо $H \in \mathbb{R}^{3x3}$ як матричне зображення дії симетрії g на площині xy, хоча це не перетворення гомографії в просторі. Таким чином,

$$H = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{\mathbf{3x3}}, \qquad (2.13)$$

де $R \in \mathbb{R}^{2x2}$ є матрицею відображення або обертання на площині xy, та $T \in \mathbb{R}^2$.

Оскільки S має групу симетрії G, для кожного i, матриці H_i' утворюють групу гомографії $G_i' = H_i G H_i^{-1}$, що сполучається з G. Ключовим спостереженням є те, що гомографії $H_i' = H_i H H_i^{-1}$щодо дії g залежить лише від і-го зображення, але обидва H_iта H_{ij}можна визначити з них, розв’язавши наступний набір лінійних рівнянь типу Ляпунова:

$$H_i' H_i - H_i H = 0, \;\; H_j' H_{ij} - H_{ij} H_i' = 0, \qquad (2.14)$$

з відомими H, H_j', H_i'. Користь симетрії потім стає зрозумілою: відносні позиції між різними видами або позиції між кожним видом і об'єктом можуть бути відновлені з інформації, кодованої в окремих зображеннях - точкове узгодження різних зображень не потрібно.

Однак деяка неоднозначність залишається у наведених рівняннях. Неважко помітити, що якщо H_i- це рішення рівняння. (2.14), то і $H_i \widetilde{H}$ для

будь-якого елемента $\widetilde{H}$ в підгрупі, що зберігає орієнтацію $\tilde{G} = G \cap SE(2)$ теж. Це відбувається тому що:

$$H_i'\left(H_i\widetilde{H}\right) - \left(H_i\widetilde{H}\right)\widetilde{H}^{-1}H\widetilde{H}) = 0. \tag{2.15}$$

та $\widetilde{H}^{-1}G\widetilde{H} = G$. Для прямокутної клітинки (тобто, не квадрата) є лише дві можливості:

$$\tilde{G} = \left\{\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}, \begin{bmatrix}-1 & 0 & 0\\ 0 & -1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\right\} \simeq \mathbb{Z}_2 \tag{2.16}$$

Це не дивно, оскільки якщо прямокутник повернути на 180 відносно його центру, то отримаємо одне і те ж зображення комірки з тієї ж точки зору. Аналогічно, для звичайного п'ятикутника $G = \{g_e = I_{3x3}, g_1 = \alpha, g_2 = \alpha^2, g_3 = \alpha^3, g_4 = \alpha^4\}$, де α представляє собою обертання на $\frac{2\pi}{5}$ щодо його центру:

$$\alpha = \begin{bmatrix}\cos(\frac{2\pi}{5}) & -sin(\frac{2\pi}{5}) & 0\\ sin(\frac{2\pi}{5}) & \cos(\frac{2\pi}{5}) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

З m зображень прямокутної клітинки ми можемо отримати до 2^m можливих рішень для позицій камери (відносно базового кадру), якщо покладатися лише на групу гомографії G' з кожного погляду. Тим не менш, цю проблему можна здебільшого вирішити, якщо зображення містять більше однієї комірки.

2.7. Відповідність зображень.

Попередні розділи висвітлювали геометрію для реконструкції клітинок симетрії. Однак кілька зображувальних властивостей, якими володіють клітини, можуть додатково усунути можливі невідповідності. Наприклад, можна врахувати схожість форми, клітинка симетрії може бути узгоджена з іншою лише якщо вони мають однакову кількість ребер та однакове співвідношення ребер. Для двох клітинок, які передають відповідність форми,

ми можемо вирівняти їх масштаби та порівняти кольорову текстуру всередині клітинок. Цей вид 2-D інформації недоступний для узгодження точок, ліній та певних локальних афінних інваріантних регіонів та ще підкреслює переваги вирівнювання декількох зображень за допомогою комірок симетрії.

Комбінуючи всі зображувальні вимірювання, ми можемо легко побудувати відповідну матрицю *M* для кожного двох зображень,чиї компоненти *(i, j)* - це подібність і-ї та j-ї клітин у двох зображеннях відповідно. Тим не менш, метод пошуку оптимальної відповідності в цій матриці не є метою цієї роботи.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ.

3.1. Виділення симетричних клітинок

Спочатку ми демонструємо ефективність алгоритму вилучення клітин симетрії, застосовуючи його до різноманітних зображень загальних сцен. Зображення показані на Рис. 11. Зліва знаходяться оригінальні зображення, зліва у центрі – виділення геометричних клітин та тест на локальну симетрію, справа у центрі – тест на локальну симетрію з нелінійною оптимізацією, справа – згруповані клітини симетрії, із відновленою позицією камери. Різні групи клітинок симетрії виділені жирними стрілками та різними кольорами нормалей. Для всіх експериментів взагалі немає ручного втручання. Система використовує той самий набір параметрів для середньої сегментації зсуву, підгонки полігону та тестування на симетрію. Усі зображення - кольорові зображення 1280x960 пікселів. Швидкість вилучення низькорівневих клітинок становить 1 хвилину на ПК Pentium4 з 1,4 ГГц, що працює під управлінням Matlab, що включає середню сегментацію трансляції та підгонку полігону. Розрахунок ієрархії симетрії без нелінійної оптимізації займає менше 5 с, але для оптимізаційної версії зазвичай потрібно кілька хвилин, залежно від того, скільки комірок витягнуто з зображення.

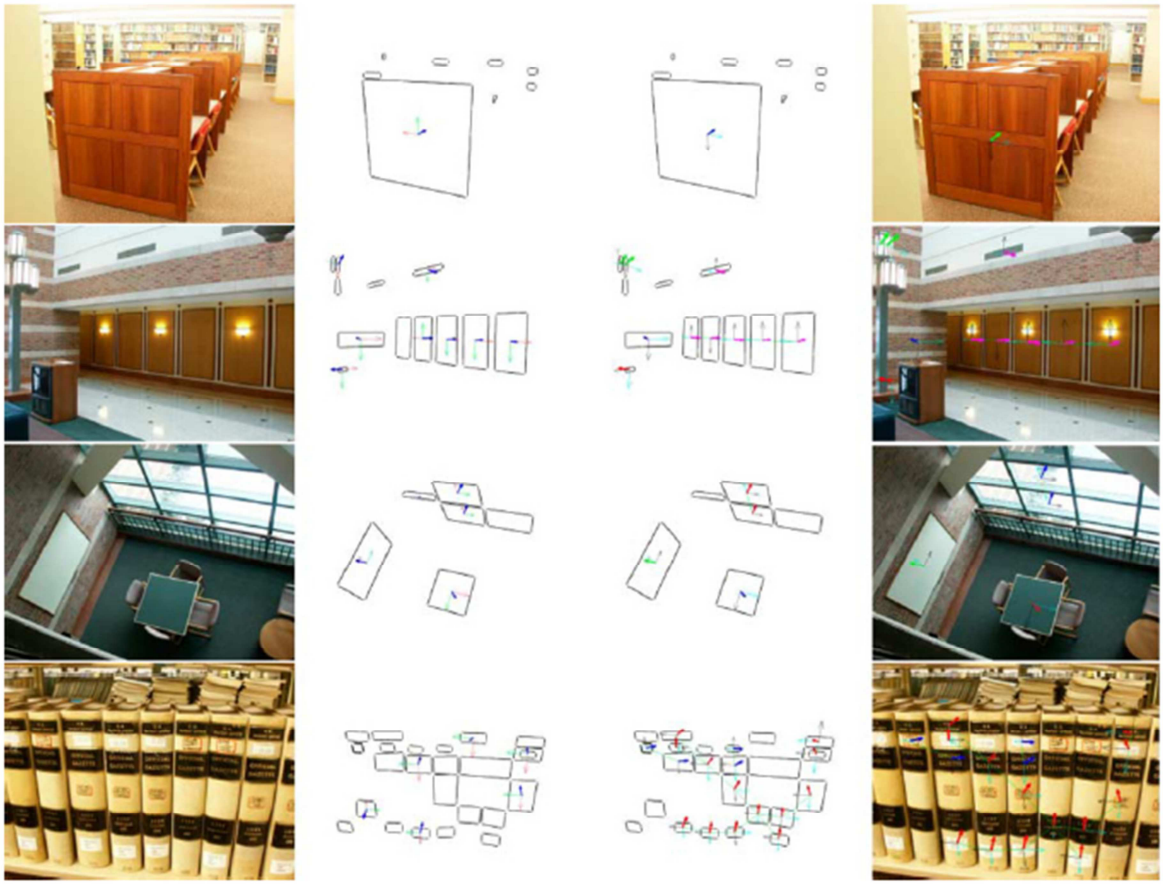


Рис. 11. Обчислювальні експерименти.

Зображення наведені у порядку складності обробки, від найлегшого до найскладнішого. Друге і третє зображення містять у собі декілька комірок і комплексів, які, очевидно, є найбільш яскравими прямокутними предметами в сцені. Система також успішно групує копланарні клітини в ті самі групи. Останнє зображення, зняте зі застарілої книжкової полиці, є найскладнішим. Більшість геометричних змістовних візерунків містять символи всередині регіонів, і вони знаходяться на контурах книги, які не є строго площинними поверхнями. Деякі межі комірок не настільки чітко визначені, і їх тривимірні геометричні співвідношення не є точними. Система все ще робить гідну роботу з вилучення та сегментування більшості комірок.

3.2. Автоматична відповідність клітинок

На Рис. 12 показано, як дві клітини симетрії автоматично витягуються і порівнюються на трьох зображеннях внутрішньої сцени. Відповідність кутів комірок виводиться з єдиного послідовного рішення для позиції камери, знайденого алгоритмом вилучення симетрії. Треба зауважити, що між першим видом та останніми двома видами є дуже великий зсув, та дуже великий поворот між другим та третім поглядами. Класичне відстеження особливостей стає зашумленим для таких великих зсувів. Але проблема стає дуже добре обумовленою, якщо спочатку застосовувати реконструкцію комірок симетрії між реальними зображеннями та їхніми «прихованими» аналогами, а потім співставляти їх у кількох видах із вже витягнутими відносними позиціями.



Рис.12. Дві симетричні клітини порівнюються на трьох зображеннях.

Алгоритм дає дуже точні рішення. Реальні значення співвідношень довжин білої дошки та таблиці становить 1,51 та 1,00, а відновлені відношення довжин - 1,556 та 1,003 відповідно. Похибка у всіх прямих кутах менше 2,5^{o}. На Рис. 13 алгоритм знаходить декілька рішень автоматично для відповідності та реконструкції симетричних комірок, виявлених на двох зображеннях внутрішньої сцени. Верхній набір зображень показує правильну відповідність чотирьох прямокутників на сцені, а дві позиції камери правильно відновлені. Середній ряд - неоднозначне рішення, зумовлене поступальною симетрією прямокутного комплексу, в якому кожен із чотирьох прямокутників на лівому зображенні зіставляється з одним праворуч без використання їх кольорової (фактурної) інформації. В результаті відновлені

позиції камери зміщуються вправо. Нижній ряд демонструє ще одну неоднозначність, що не тільки відповідність зміщується через трансляційну симетрію, але вона порушується й через обертальну симетрію чотирьох прямокутників як цілого комплексу. На щастя, обох неоднозначних рішень можна уникнути, якщо текстурна інформація використовується для узгодження.

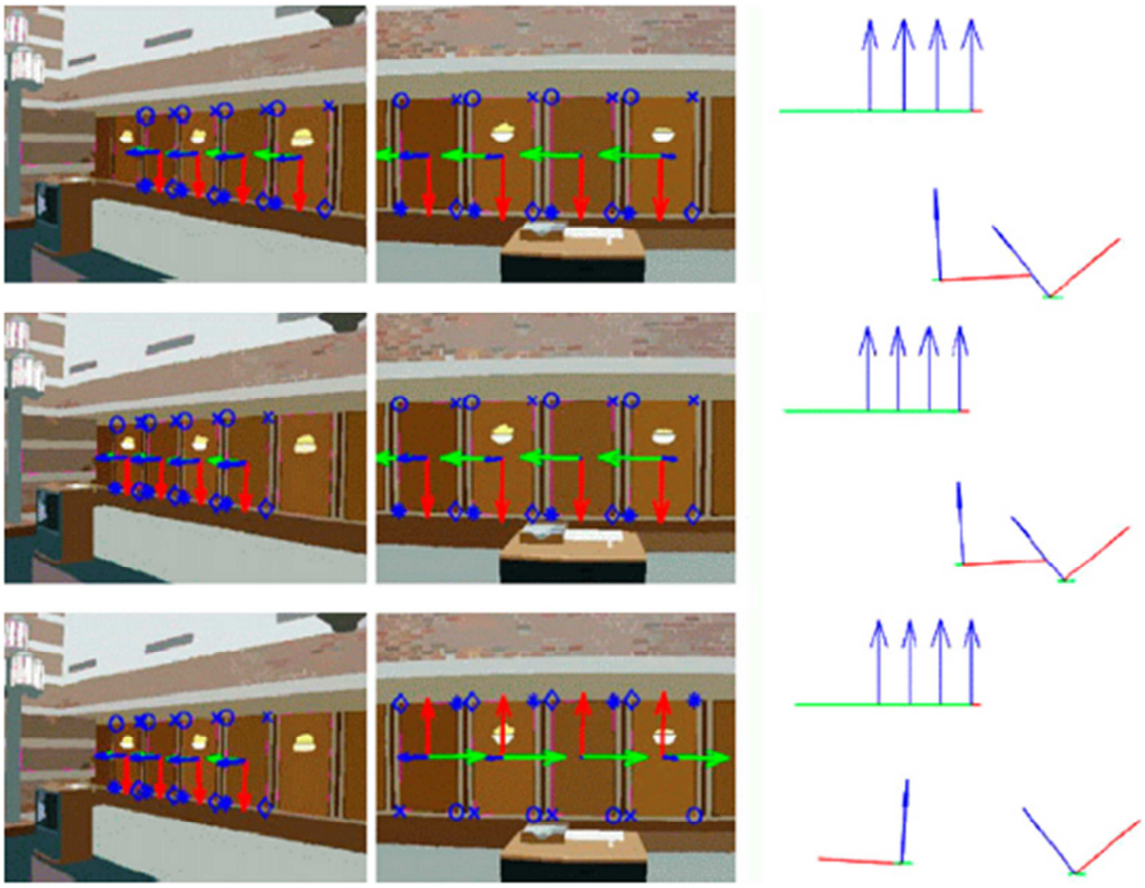


Рис.13. Різні відповідності для чотирьох прямокутників у кожному зображенні. У першому ряді показано правильні відповідності.

3.3. Напівавтоматична реконструкція сцени

Неоднозначності, показані на рис. 13, можуть стати надзвичайно складними, якщо на сцені буде багато подібних комірок. Наприклад, комплекс симетрії вікон, показаний на рис. 14, може призвести до багатьох неоднозначних збігів. У таких випадках необхідне ручне втручання, якщо

потрібна реалістична 3-D реконструкція. Наш алгоритм все ще допомагає мінімізувати необхідну взаємодію вручну. Для зображень на Рис.14 користувачеві потрібно лише вказати, які клітини (не точки) відповідають яким на зображеннях, а алгоритм автоматично знайде послідовний набір камер з відповідних клітинок, як показано на Рис. 15 вгорі . Виходячи з відновлених позицій камери, наступна 3-D реконструкція структури показана на рис. 15 знизу. 3-D модель представлена як кусково-площинна з відрізаними вручну деталями, що не належать будівлі. Кути між нормальними векторами двох ортогональних стінок відрізняються від 90^o в середньому на 1^o навіть без будь-якої нелінійної оптимізації. Весь процес (від моменту фотографування) займає менше 20 хв.



Рис.14. П'ять зображень, що використовуються для реконструкції будівлі. Останнє зображення використовується виключно для отримання інформації на даху.

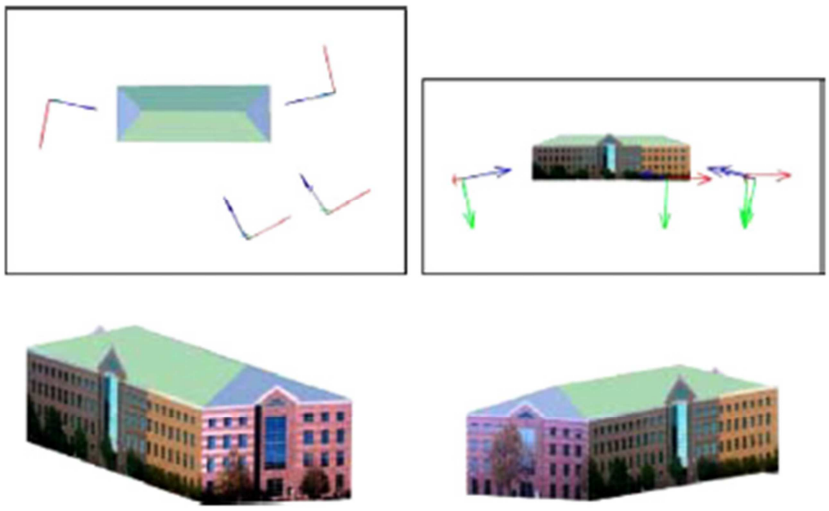


Рис. 15. Заміна даху будівлі та реконструйована 3-D модель.

ВИСНОВКИ

Мета та задачі, поставлені в цій роботі, були виконані. А саме:

- Було створено технічне завдання;
- Проведено аналіз різних підходів для реконструкції тривимірної поверхні з двовимірних зображень;
- Обрано алгоритм реконструкції;
- Реалізовано обраний алгоритм у середовищі MATLAB;
- Програму було протестовано.

Розроблено комплекс алгоритмів, призначених для розв’язку задачі реконструкції тривимірної поверхні за із використанням визначених симетрій обертання та трансляції на двовимірних зображеннях.

Ця робота демонструє, що обчислювально можливо представити зображення техногенного середовища на основі точної тривимірної геометричної інформації. Ключовим для цього є те, що групи симетрії, допущені (площинними) симетричними об'єктами в просторі, точно кодуються на зображенні через групи гомографії. Це передбачає, що 3-D інформація не втрачається через перспективну проекцію для симетричних об'єктів. Результатом такої сегментації на основі геометрії є ієрархічне подання симетричних об'єктів з точки зору їх просторових геометричних властивостей та співвідношень.

Відповідно, архітектура цього методу виявлення симетрії також є ієрархічною. Це дозволяє розробляти алгоритми для кожного шару відносно незалежно. Обчислювально, місцеві та глобальні тести на симетрію вводяться між різними шарами, щоб гарантувати узгодженість геометричної ієрархії. Хоча цей механізм, ймовірно, буде відхиляти деякі дійсні комірки через шум, він дозволяє значно скоротити кількість помилкових позитивних результатів при вилученні осередків симетрії, що важливо для застосувань високого рівня.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] J. Weng, T.S. Huang, N. Ahuja, Motion and Structure from Image Sequences, Springer Verlag, 1993.

[2] Mencl, R., 2001: Reconstruction of Surfaces from Unorganized 3D Points Clouds. PhD Thesis, Dortmund University, Germany

[3] Patias, P., 2001b: Visualization Issues in Photogrammetry. Proc. of the 3 rd International Seminar on New Development in Digital Photogrammetry, Gifu, Japan, pp. 4-6

[4] Boissonnat J-D. Geometric structures of three-dimensional shape reconstruction.ACM Trans.Graphics,1984;3(4):266–86.

[5] Edelsbrunner H,Mucke E. 3D alpha shapes. ACM Transactions on Graphics, Vol.(13), No.(1),43–72

[6] Guo B, Menon J, Willette B. Surface reconstruction using alpha shapes. Comput Graphics Forum ,997;16(4):177-90.

[7] Bernardini F, Mittleman J, Rushmeier H,Silva C, Taubin G. The ballpivoting algorithm for surface reconstruction. IEEE Trans Visualization Comput Graphics 1999;5(4):349–59.

[8] Huang J,Menq CH.Combinatorial manifold mesh reconstruction and optimization from unorganized points with arbitrary topology. Comput-Aided Design,2002;(34):149–65.

[9] Qing Wang, Rong-qing Wang, Hujun Bao, et al. A fast progressive surface reconstruction algorithm for unorganized points[J].Journal of Software,2000,11(9):1221-1227.

[10] Hong-Wei Lin, Chiew-Lan Tai, Guo-jin Wang. A Mesh Reconstruction Algorithm Driven by Intrinsic Property of Point Cloud [J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(1):1-9

[11] Jianrong Tan, Lixin Li. surface reconstruction algorithm based on properties of local smooth and the topology of scattered points [J].Journal of Software,2002, 13(11): 2121-2126.

[12] Jingqi Yan, Pengfei. Shi A new approach to 3D object surface reconstruction from unorganized points [J]. Chinese Journal of Computers,2001, 24(10):1051-1056.

[13] Rurong Zhou, Liyan Zhang, Xu Su, et al. massive the surface reconstruction algorithm of scattered points [J]. Journal of Software,2001,12 (2):249-255.

[14] Chuan-Chu Kuo,Hong-Tzong Yau. A Delaunay-based region-growing approach to surface reconstruction from unorganized point[J].Computer-Aided Design,2005,37:825-835.

[15] Qing Zhu, Fengchun Li, Yeting Zhang. An improved the region growing algorithm of three-dimensional point set [J].Wuhan University Journal,2006, 31(8): 667-670.

[16] Fengchun Li , Jun Gong , Qing Wang. Surface modeling approach based on the fine three-dimensional TIN [J]. Computer

Applications，2006,8:159-161.

[17] Chen W., Fu Z.-J., Chen C.S. Recent Advances in Radial Basis Function Collocation Methods // SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, Springer, New York, NY. – 2014. – 98 pp.

[18] Greg Turk, Huong Quynh Dinh, James F O'Brien, and Gary Yngve. Implicit surfaces that interpolate. In Shape Modeling and Applications, SMI 2001 International Conference on., pages 62–71. IEEE, 2001.

[19] H. Wendland. Scattered data approximation, volume 2. Cambridge University Press Cambridge, 2005.

[20] P.C. Curtis. n-parameter families and best approximation. Pacific Journal of Mathematics, 9(4):1013–1027, 1959.

[21] Rio Yokota, L.A. Barba, and Matthew G. Knepley. Petrbf a parallel o(n) algorithm for radial basis function interpolation with gaussians. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199(25):1793 –1804, 2010.

[22] S. M. Allen and J.W. Cahn, “A microscopic theory for antiphase boundary motion and its application to antiphase domain coarsening,” Acta Metallurgica et Materialia, vol. 27, no. 6, pp.1085–1095, 1979.

[23] Y. Li and J. Kim, “A fast and accurate numerical method for medical image segmentation,” Journal of the Korean Society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 14, no. 4, pp. 201–210, 2010.

[24] R. K. Beatson, J. B. Cherrie, and D. L. Ragozin. Fast evaluation of radial basis functions: Methods for four-dimensional polyharmonic splines. SIAM J. Math. Anal., 32(6):1272–1310, 2001.

[25] R. K. Beatson andW. A. Light. Fast evaluation of radial basis functions: Methods for two-dimensional polyharmonic splines. IMA Journal of Numerical Analysis,
17:343–372, 1997.

[26] J. Flusser. An adaptive method for image registration. Pattern Recognition, 25(1):45–54, 1992.

[27] L. Greengard and V. Rokhlin. A fast algorithm for particle simulations. J. Comput. Phys, 73:325–348, 1987.

[28] V. V. Savchenko, A. A. Pasko, O. G. Okunev, and T. L. Kunii. Function representation of solids reconstructed from scattered surface points and contours. Computer Graphics Forum, 14(4):181–188, 1995.

[29] N. Dyn, D. Levin, and S. Rippa. Numerical procedures for surface fitting of scattered data by radial functions. SIAM J. Sci. Stat. Comput., 7(2):639–659, 1986.

[30] H. Hoppe, T. DeRose, T. Duchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle. Surface reconstuction from unorganized points. Computer Graphics (SIGGRAPH’92 roceedings), 26(2):71–78, July 1992.

[31] SILVA C. T., FREIRE J., CALLAHAN S. P.: Provenance for visualizations: Reproducibility and beyond. Comp. in Science
& Engineering (2007).

[32] Edelsbrunner H,Mucke E. 3D alpha shapes. ACM Transactions on Graphics, Vol.(13), No.(1),43–72

[33] Fengchun Li , Jun Gong , Qing Wang. Surface modeling approach based on the fine three-dimensional TIN [J]. Computer Applications，2006,8:159-161.

[34] Yongyu Zhang. Jinsong Ma . The algorithm of the linear octree to establish spatial index and query in 3D GIS[J]. Computer Engineering and Science,2009(2);61-63.

[35] SCHNABEL R., DEGENER P., KLEIN R.: Completion and reconstruction with primitive shapes. Computer Graphics Forum (Proc. of Eurographics) (2009).