УДК 004.09

Глибовець М. М., Гороховський С. С., Михальчук В. О.

ЗАСТОСУВАННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ СТЕРЕОПАР

У роботі приведено опис та реалізація інфекційного алгоритму розв'язку однієї з основних задач стереозору – суміщення стереопар.
Ключові слова: *інфекційні алгоритми, стереозор, суміщення стереопар.*

В статье описан предлагаемый инфекционный алгоритм решения одной из основных задач стереозрения – совмещение стереопар и его реализацию.
Ключевые слова: *ифекционные алгоритмы, стереозрение, совмещение стереопар.*

The article describes the proposed infectious algorithm of solution one of the main problem of stereovision (stereopsis) – combining stereo pairs and its implementation.
Key words: *infectious algorithms, stereovision , combining stereo pairs.*

Вступ

Спроба застосування біологічних підходів у комп'ютерній науці не є абсолютно новим підходом. Список стратегій, натхнених природою, є досить широким: нейронні мережі, генетичні алгоритми, генетичне програмування тощо. У даній статті розглядається ще один метод, заснований на біологічній концепції епідемії [1], для розв'язку проблеми побудови стереовідповідності зображень. Основою методу є штучний епідемічний процес, що називається алгоритмом інфекції.

Задача побудови стерео відповідності зображень є однією з основних у комп'ютерному (машинному) зорі для тривимірної реконструкції сцени і має багато практичних застосувань: навігація робота, розпізнавання об'єктів, реалістична візуалізація сцени а також рендеринг заснований на зображенні. Відомо, що задача побудови відповідності зображень є NP-повною.

Уточнимо нашу задачу. Потрібно знайти відповідності інформаційному наповненню двох зображень, для того щоб одержати тривимірну інформацію, яка дозволить побудувати модель проекції з точки зору, що відрізняється від початкових фотографій. Цей процес відомий як синтез зображення [2].

Запропонований нами алгоритм дістає дані із зображення так, щоб використовувати тільки необхідну тривимірну інформацію про глибину, заощаджуючи обчислювальний час. Алгоритм базується на розподілених правилах, які поширюються як штучна епідемія по зображенню.

Ми будемо надалі постійно вживати такі терміни як вірус, інфекція, епідемія. Вважатимемо їх синонімічними. У контексті даної статті ці слова позбавлені сильно вираженого біологічного забарвлення і використовуються лише з метою порівняння механізму дії. На відміну від реального життя, в даній галузі епідемія є скоріше позитивним ніж негативним явищем.

Епідемічний (інфекційний алгоритм) – алгоритм в основі якого є поширення деякого типу інформації, взагалі кажучи в регулярній структурі, наприклад, решітці, шляхом моделювання штучної епідемії (хвороби).

Наразі існує багато підходів для вирішення задачі стереовідповідності зображень. В основному ці підходи можна класифікувати як локальні й глобальні методи. Локальні методи включають відповідність блоків, оптимізацію засновану на градієнті та врахування особливостей зображень. Глобальні підходи – це динамічне програмування, стандартні криві, графи-вирізки, нелінійне поширення, поширення чуток і багато інших [2].

Використання класичних точних методів є обмеженим через їхню часову складність та довжину вхідних даних для реальних зображень. Це основна причина чому почали застосовувати інфекційні алгоритми у цій області.

Метою статті є детальне дослідження проблеми побудови стереовідповідності шляхом застосування епідемічного (інфекційного) алгоритму та опис розробленої системи, яка б на вхід отримувала стереопару і шляхом застосування епідемічного алгоритму суміщала ліве та праве зображення.

1. Сучасний стереозір

Стереопара – сукупність двох плоских зображень одного об'єкта, що має відмінності між зображеннями, отриманих з різних ракурсів. Якщо стереопару розглядати так, щоб кожне око бачило лише одне з цих зображень, виникає об'ємна стерескопічна картина, що відтворює глибину реального об'єкту.

Стереопари використовують для створення просторових зображень об'єктів у 3D-моделюванні, рендерингу заснованому на зображеннях, стереоскопічному кіно, стереофотографії, стереоскопічному телебаченні, у наукових цілях тощо. Зокрема широке застосування стереопари знайшли у військовій галузі [3].

Епіполярна геометрія – геометрія декількох проекцій. У зображенні міститься доволі багато інформації, хоча визначити глибину точки сцени та відповідну проекцію за єдиною фотографією неможливо. Разом з тим, за наявності як мінімум двох зображень, глибину можна визначити шляхом триангуляції. Слід розуміти, що декілька проекцій та конфігурація камер накладають деякі геометричні та алгебраїчні обмеження на тривимірну структуру сцени [4]. В контексті бінокулярного стерео зору, перше зображення будь-якої точки має лежати на площині, яка утворена другим зображенням та оптичними центрами двох камер. Це епіполярне обмеження можна алгебраїчно представити у вигляді матриці 3 х 3, що називається *суттєвою*.

Найбільш складна частина аналізу стереоданих – визначення відповідностей між двома зображеннями. Епіполярне обмеження сильно звужує процедуру пошуку таких відповідностей.

Введемо деякі базові поняття геометрії кількох проекцій.

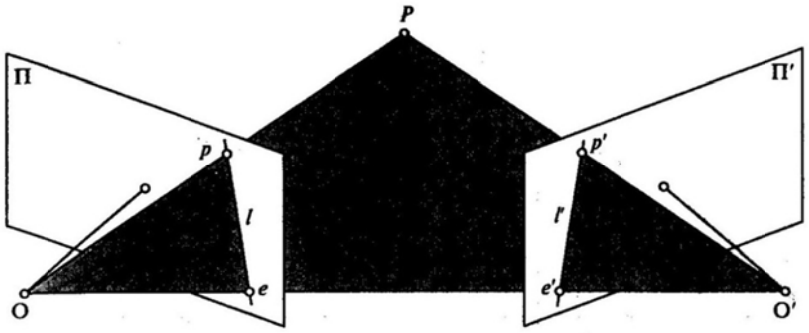

Рис. 1. Епіполярна площина

Отже, розглянемо два зображення p, p' точки P, яку спостерігають двома різними камерами з *оптичними центрами* у точках O і O'. Ці п'ять точок лежать на *епіполярній площині*, що визначається двома перетинаючимися променями OP та OP' (див. рис. 1). Окрім, точка p' лежить на лінії l' – лінії перетину даної площини та «чутливої» області П' другої камери. Лінія l' – це *епіполярна лінія*, яка відповідає точці p; лінія l' проходить через точку e' – точку перетину базової лінії, що з'єднує оптичні центри O і O', з площиною П'. Аналогічно, точка p лежить на епіполярній лінії l, відповідній точці p', і ця лінія проходить через точку e – точку перетину базового променя з площиною П.

Точки e і e' називають епіполюсами двох камер. Епіполюс e' – це проекція оптичного центру O першої камери на зображення, яке спостерігається другою камерою, і навпаки. Як було щойно зазначено, якщо p і p' – зображення однієї точки, тоді точка p' має лежати на відповідній епіполярній лінії. Це епіполярне обмеження є фундаментальним в аналізі стереозображень.

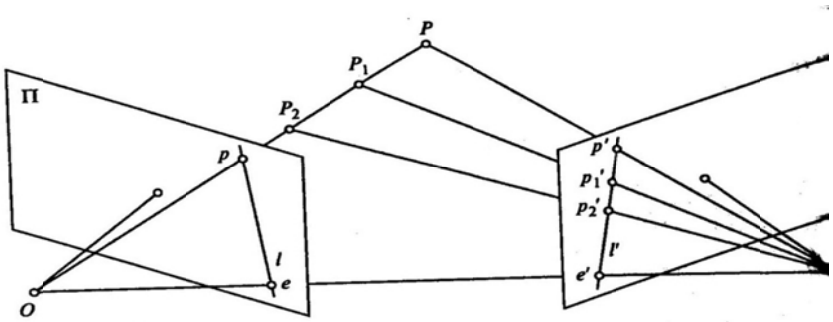

Рис. 2. Епіполярне обмеження

На рисунку 2 проілюстровано епіполярне обмеження: набір можливих образів точки p обмежується множиною точок, які лежать на відповідній епіполярній лінії l'.

Нехай відомі внутрішні параметри кожної камери. Очевидно, що з епіполярного обмеження випливає компланарність трьох векторів Op, $O'p'$, OO'. Еквівалентним є наступне твердження: кожен з перелічених векторів має лежати в площині, яка натягнута на інші два, тобто

$$Op \cdot \left[OO' \times O'p' \right] = 0 .$$

Це рівняння можна переписати в наступному вигляді (рівняння Лонгета-Хіггінса) [2]

$$p^T E p' = 0 ,$$

де p, p' два вектори зображень відповідних точок в однорідних координатах.

Матриця E називається *суттєвою матрицею*. Треба зазначити, що вираз Ep' можна проінтерпретувати як вектор епіполярної лінії, що відповідає точці першого зображення.

Стереозір включає в себе два процеси: суміщення деталей, що спостерігаються двома (або більшою кількістю) камерами і відновлення їх тривимірного прообразу. Процес відновлення є відносно простим: прообраз відповідних точок можна знайти як точку перетину променів, які проходять через ці точки і центри відповідних діафрагм камер. Відповідно, якщо характерну точку зображення можна спостерігати у будь-який момент часу, то стереозір реалізується просто. В той же час, кожна сцена складається з сотень тисяч пікселів, а характерних елементів зображення (наприклад, кутів) може нараховуватись десятки тисяч, тому для знаходження точних відповідностей між точками різних зображень сцени потрібні спеціальні методи, які виключають помилкові виміри глибини. В цьому процесі основну роль грає епіполярна умова, оскільки тоді пошук відповіднстей відбувається лише на відповідних епіполярних лініях.

Далі в роботі будемо вважати, що всі камери відкалібровані, так що їх внутрішні та зовнішні параметри точно обчислені відносно деякої зовнішньї системи відліку.

Відношення Лонгета-Хіггінса справедливе для внутрішньо відкаліброваних камер. Якщо ж внутрішні параметри невідомі (випадок невідкаліброваних камер), то можна записати $p = K\hat{p}$ і $p' = K'\hat{p}'$, де K, K' – калібровні матриці, а $\hat{p}, \hat{p}'$ – нормовані вектори координат точок зображення [5]. Для цих векторів відношення Лонгета-Хіггінса працює, тому отримуємо

$$p^T \cdot F \cdot p' = 0,$$

де $F = K^{-T} \cdot E \cdot K'^{-1}$ – *фундаментальна матриця*, в загальному випадку не тотожна суттєвій матриці. Ранг фундаментальної матриці дорівнює двом. Зазначимо, що Fp' – епіполярна лінія, відповідна точці p'. Аналогічно для точки p.

2. Базові концепції стереоалгоритмів

Фундаментальним твердженням, що лежить в основі стерео алгоритмів є те, що кожна точка у тривимірному просторі має дві унікальні проекії на двовимірні зображення з різних точок зору. З іншого боку, якщо можливо знайти дві точки на зображеннях з різних камер, які відповідають одній фізичній точці простору, тоді можна обчислити її точні тривимірні координати. Незважаючи на це, простого розв'язку цієї задачі не існує. Сама природа проблеми визначає деякі неточності побудови відповідностей наприклад через брак текстурної інформації. Тому вводять деякий набір обмежень та припущень для того, щоб можна було розв'язати задачу.

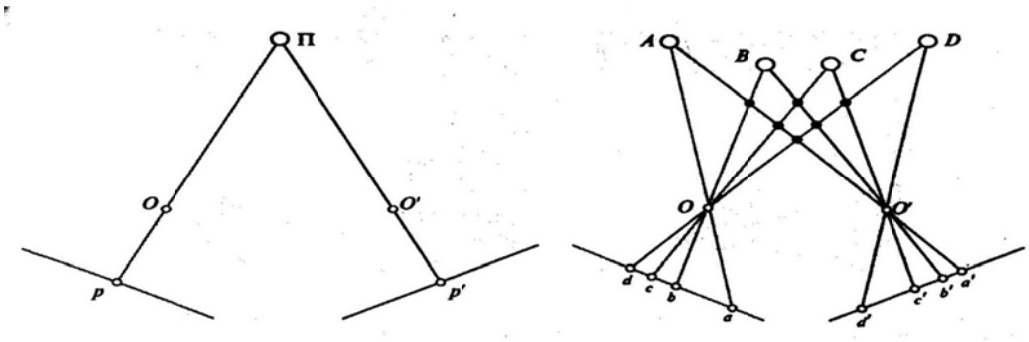

Рис. 3. Правильні та некоректні прообрази

Розглянемо задачу бінокулярного суміщення зображень (рис. 3). Зліва – найпростіший випадок, неоднозначність відсутня, тому відновлення стереозображення є доволі простою задачею. У більш поширеному випадку справа: будь-яка з чотирьох точок лівого зображення може, апріорі, співпадати з будь-якою з чотирьох точок правого зображення. Однак справедливими є лише чотири з таких відношень, інші дають некоректне відновлення прообразу.

Ситуація може ускладнитись через похибки вимірювання: в цьому випадку можна застосувати метод тріангуляції.

Обчислення в алгоритмах стереозору можна спростити, якщо використовувати очищені зображення (тобто еквівалентні зображення з єдиною площиною зображення, паралельною базовій лінії, яка з'єднує два оптичні центри – рис. 4).

Отже, побудова стереовідповідності зводиться до розв'язку задачі визначення тривимірної структури об'єкта з двох або більшої кількості зображень отриманих з різних ракурсів.

3. Інфекційний алгоритми та клітинні автомати

Поширеним застосуванням епідемічних алгоритмів є розповсюдження інформації в гетерогенних середовищах, які є динамічними в часі. Одним з найбільш відомих і перших епідемічних алгоритмів є «гра життя» [6]. Середовище для цього алгоритму – поле клітин. Кожна з яких, відповідно, має вісім сусідів.

Інформація або властивість, що повинна бути розповсюджена, є зерном життя. Кожна клітинка може перебувати в двох станах: бути живою або бути мертвою.

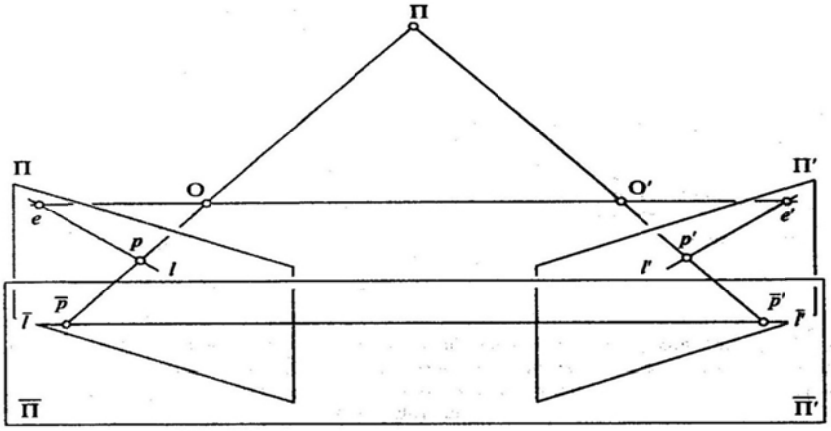

Рис. 4. Очищення стереопари

Розподіл живих клітинок на початку гри називається першим поколінням. Кожне наступне покоління утворюється на основі попереднього за певними правилами: народження, смерті і виживання. Використання навіть найпростіших з правил призводить до виникнення величезної кількості різноманітних форм, кожна з яких має дещо спільне з попередньою.

Набір правил розповсюдження повністю залежить від алгоритму й може бути вільно обраний. Єдиною вимогою є те, що у деякий час t юніт може перебувати в одному з наступних станів:

– Сприйнятливий (чутливий): юніт нічого не знає про певну інформацію, не є носієм інфекції але може одержати цю інформацію і стати інфікованим.

– Інфікований: юніт знає певну інформацію, є носієм інфекції й використовує набір правил для розповсюдження інформації (інфекції).

– Вилучений (відновлений): юніт знає певну інформацію, є носієм інфекції але не поширює її.

В кожному епідемічному алгоритмі існує так звана популяція – множина інтерактивних взаємодіючих одиниць (вузлів, юнітів). Ці юніти використовують набір правил, який визначає як розповсюджується інформація, що є предметом інтересу для інших вузлів. Цей набір правил залежить від конкретного алгоритму і може бути обраним довільно.

Мотивація до використання алгоритмому інфекції для розв'язку задачі *побудови стеревідповідності* така. По-перше, коли людина спостерігає сцену, вона не фіксує абсолютно всі деталі на ній. Людина зосереджує свою увагу на деяких деталях сцени, які найбільш зацікавлять її. Отже, багато з процесів людської уваги досить випадкові та засновані на інтуїції (що також може бути причиною оптичних ілюзій). По-друге, процес отримання даних від характерних точок може бути змодельований як поширення відповідностей. А це, в свою чергу, асоціюється з поширенням хвороби в деякій популяції.

Клітинний автомат є динамічною системою, поведінка якої повністю визначається в термінах локальних залежностей. Множина клітин, які впливають на значення даної, за винятком її самої, називається околом клітини. Окіл клітини зручніше задавати, якщо на решітці ввести метрику; для зручності, можна говорити про решітку, як про дискретний метричний простір. Одна з головних відмінностей клітинної системи від усіх інших обчислювальних систем полягає в тому, що у всіх інших системах присутні дві принципово різні частини: архітектурна, котра фіксована й активна (тобто, виконує деякі операції) і дані, які змінні й пасивні (тобто самі по собі вони нічого зробити не можуть). У клітинних автоматів і та, й інша частини складаються із принципово ізоморфних елементів. Таким чином, обчислювальна система може оперувати з своїми частинами, модифікувати, розширювати себе й будувати собі подібних.

Якщо порівнювати клітинні автомати й звичайні диференціальні рівняння (ЗДР), то одна з основних відмінностей перших від других полягає в локальності правил, за допомогою яких описується динаміка системи. У випадку застосування ЗДР ми користуємося деякими правилами зміни усереднених по всій системі величин. При цьому роблять початкове припущення, що такі правила існують. У випадку КА існування таких узагальнених правил необов'язково. Досить знати закони розвитку системи на мікро-рівні, в невеликих просторових областях (осередках), з яких складається макросистема. Важливо лише, що ці локальні правила однакові для всіх областей.

Зазначимо основні властивості класичної моделі клітинних автоматів [7] – локальність правил та однорідність системи. Перша означає, що на новий стан клітини можуть впливати тільки елементи її околу й, можливо, вона сама. Однорідність визначає, що жодна область решітки не може бути розрізнена від іншої за якими-небудь особливостями правил і т. п. Однак на практиці решітки є скінченою множиною клітин. У результаті можуть мати місце крайові ефекти. Клітини, які розташовані на границі решітки будуть відмінні від інших за числом сусідів. Щоб уникнути цього можна ввести періодичні крайові умови.

Важливим є і те, що множина можливих станів клітини – скінчена. Ця умова необхідна, щоб для одержання нового стану клітини була необхідна скінчена кількість операцій. Зазначимо, що це не заважає використовувати клітини для зберігання дійсних чисел для розв'язку прикладних завдань.

І на кінець, значення у всіх клітинах змінюються одночасно – наприкінці ітерації. В іншому випадку порядок перебору клітин решітки, під час ітерації, істотно впливав би на результат. Хоча на практиці, при вирішенні певних завдань, виникає потреба в тому, щоб відмовитися від останніх трьох властивостей.

Динаміка клітинних автоматів має в основі наступні спостереження фізичних систем: інформація розповсюджується зі скінченою швидкістю, закони фізики не залежать від положення спостерігача

Клітинний автомат це четвірка $A = (S, d, N, f)$, де S – скінчена множина, d – натуральне число, $N \subset Z^d$, скінчена множина, $f : S^N \to S$ – довільна функція.

Маючи скінчену множину S та натуральне d, можемо розглянути d-вимірну решітку в якій кожен вузол має значення з множини S. А функція f є правилом переходу.

Епідемічний клітинний автомат [8] це клітинний автомат $E = (S, d, N, f)$, де $S(|S| = 5)$ – множина станів, $d = 2$. До того ж, множина S уточнюється так: $S = \{\alpha_1, \varphi_2, \beta_3, \varepsilon_0, *\}$ – скінчений алфавіт, $S_f = \{\alpha_1, \beta_3\}$ – множина вихідних станів, $S_0 = \{\varepsilon_0\}$ початковий стан.

Наш епідемічний автомат може перебувати в чотирьох наступних станах:

– недоступний або сприйнятливий (Not Exposed, Susceptible), відповідає клітині, яка не була заражена вірусом – пікселі, що перебувають в початковому стані;

– доступний або відкритий (Exposed), відповідає клітинам, які вже були інфіковані вірусом – пікселі, що були виділені для обчислення їх відповідностей;

– інфікований (Proposed, Infected), відповідає клітинам що набули вірус, разом з тим мають шанс побороти інфекцію й одужати (пікселі, відповідність яких була вгадана алгоритмом), пізніше може бути знайдена точніша відповідність на основі локальної інформації;

– відновлений (Automatically Allocated, Recovered), відповідає клітинам, які не можуть бути заражені вірусом. Цей стан представляє клітини, що мають імунітет до інфекції (пікселі яким алгоритм автоматично визначив відповідність).

Такий тип епідемій відноситься до класу SEIR (Susceptible-Exposed-Infected-Recovered), йому характерний інкубаційний період та латентність.

Епідемічний клітинний автомат використовує спеціальний окіл для того, щоб використати епіполярне обмеження. Цей окіл можна поділити на дві частини: внутрішній, який складається з восьми найближчих клітин, та зовнішній, що складається з шістнадцяти спеціально обраних клітин, таким чином щоб зафіксувати один з восьми основних напрямків для епіполярної прямої. Отже, епідемічний окіл складається з двадцятип'яти клітин, включаючи центральну.

4. Інфекційний алгоритм для стереопари

Розглянемо поняття детектора границь, що є важливим як для розуміння самого інфекційного алгоритму, так і для його реалізації.

Корнер детектори

Визначення границь (corner detection) – процес виділення деяких характерних рис у зображенні, який також називають визначенням характерних точок. Корнер детектори широко використовуються у розпізнаванні образів, порівнянні зображень, 3D-моделюванні тощо. Нас вони цікавлять лише з точки зору ефективного методу ініціалізації інфекційного алгоритму. У визначенні границь використовується специфічний, відносно складний математичний апарат.

Ми використали C++ реалізацію алгоритму Харріса-Стівенса визначення границі, сирці якого доступні для завантаження за посиланням http://en.pudn.com/downloads51/sourcecode/graph/detail177894_en.html.

Цей алгоритм точно визначає особливі точки, за рахунок чого є цілком прийнятним для більшості застосувань. Плоскі однаково текстуровані фрагменти залишаються поза областю дії.

Інфекційний алгоритм

Алгоритм працює так. Спочатку треба відкалібрувати систему, тобто обчислити матрицю проектування та фундаментальну матрицю. Оскільки використовуються справжні стереопари, то для простоти обмежимося розглядом лише статичних сцен (рухається лише камера, не сцена).

Кінцевою метою є знаходження максимальної кількості існуючих відповідностей згідно введених правил. Ці правила тісно пов'язані з природою самої задачі та визначені і зберігаються в файлі. Вони визначають бажану глобальну поведінку, незважаючи на те що застосовуються лише локально – в околі сусідів. На кожному кроці алгоритм сканує множину правил і визначає наступний стан базуючись на локальній інформації.

Ця система є гнучкою: правила у локальних околах сусідів напряму впливають на глобальну поведінку всієї системи. Наприклад, це дозволяє отримати різні швидкості поширення інфекції (що напряму пов'язане з часом обчислень) та різні рівні якості результатів побудови стерео відповідності.

На кожному кроці визначається стан кожної локальної клітини і стан її локального околу сусідів. Далі алгоритм переглядає набір правил. Обирає те правило, що відповідає поточному локальному стану (стану центральної клітини, кількості сусідів в кожному стані та точним станам в найближчому околі).

Обчислення пікселя алгоритмом відбувається так. За допомогою фундаментальної матриці обчислюється епіполярна пряма, визначається вікно кореляції відцентроване у відповідності до епіполярної прямої (кореляція є основним критерієм для визначення відповідності між пікселями на лівому та правому зображенні).

Якщо центральна клітина є «відновленою», то суміщається кут епіполярної прямої та обмеження орієнтованості «відкритих» сусідів. Далі алгоритм зберігає координати відповідного пікселю, в іншому віпадку піксель обчислюється. Результатом роботи алгоритму є синтетичне зображення, яке є проекцією сцени з точки споглядання, що знаходиться між двома початковими зображеннями.

Основними кроками алгоритму є:

– *Всі пікселі ініціалізуються значенням «сприйнятливий».*

– *Визначаються пікселі, які представляють максимальний інтерес. Вони переходять у стан «відкритий» (це є зерна інфекції).*

– *Правила переходу застосовуються до кожного пікселя, що не перебуває у стані «відновлений» або «відкритий».*

– *Поки існує хоча б один піксель не у «відновленому» або «відкритому» стані, повернутися на крок 3.*

У вільному доступі програмних продуктів для суміщення стереопар нашого типу, не існує. Доступними є декілька застосувань, які з стереопари одразу будують 3D-модель, наприклад «Image 2D to 3D converter» (http://sourceforge.net/projects/i3d-converter/). Всі вони мають статус прототипів. Саме тому практичну реалізацію довелося починати фактично з нуля, не маючи можливості просто змінити реалізацію існуючого алгоритму на епідемічний.

На рисунку 5 представлена модель системи. Маємо три зображення: ліве, праве та віртуально-відновлене (вихідний результат). Кожне з зображень задається двовимірним масивом комірок Cell. Кожна комірка представляє піксель, але крім того, має додаткові атрибути: коодинати _x, _y, та стан state.

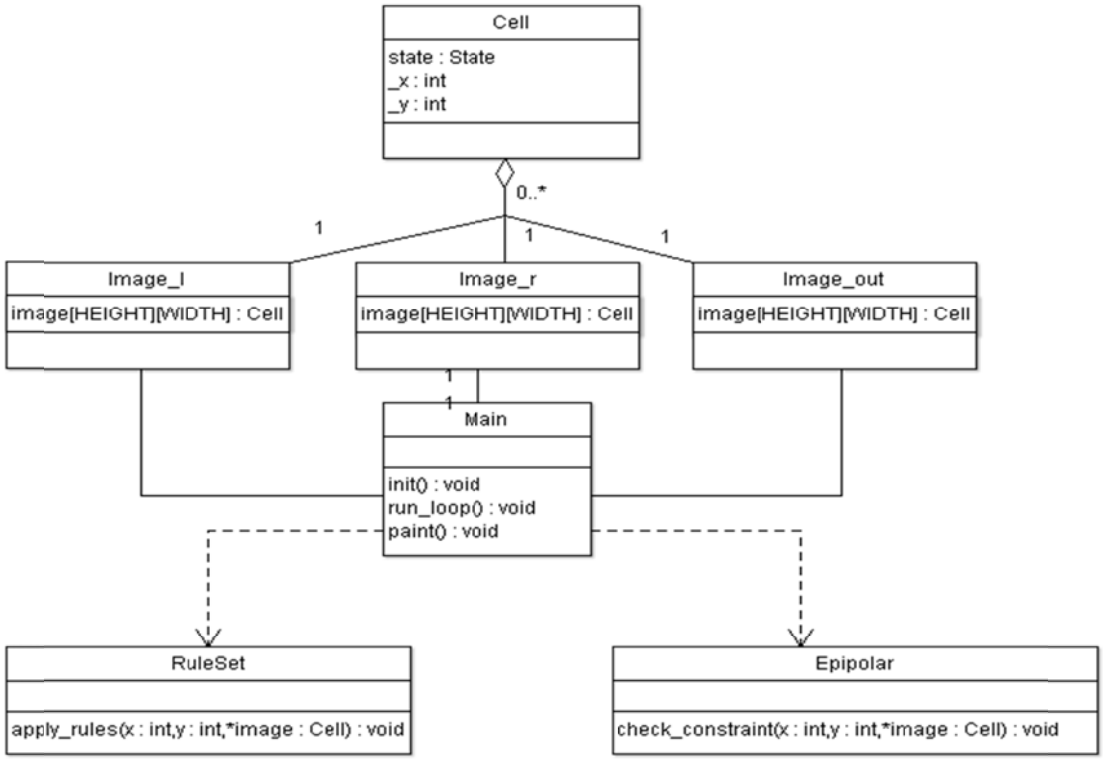

Рис. 5. Модель

Основним є метод run_loop() в якому відбуваються ітерації переходів клітинного автомата. Перегляд комірок іде покроково, але зміна станов відбувається одночасно, коли все зображення було оброблене.

```
susceptible = HEIGHT * WIDTH;
...
while ((infected_num) && (susceptible_num)) {
    …
    run_loop();
}
```

Додатковий клас RuleSet використовується для підбору та застосування правил переходу.

Очевидно, що інфекційний алгоритм у застосуванні до стереопар теж має експоненційну складність у найгіршому випадку. Разом з тим, в багатьох випадках епідемічний підхід дозволяє значно скоротити кількість обчислень, приблизно від 40 % до 80 % (в порівнянні з класичними алгоритмами). Цьому є декілька причин.

Вдале початкове розташування зерен інфекції – велика частина успіху. Саме для цього для ініціалізації завжди використовують один з точних детекторів границь (в нашому випадку детектор Харріса). Крім того, динаміка роботи алгоритму суттєво залежить від природи задачі, грубо кажучи, від «тематики» сцени спостереження (наприклад, ми можемо змінювати правила переходу епідемічного клітинного автомату в залежності від того, чи на зображеннях, скажімо, поверхня з космосу, чи фотографії інтер'єру вашої квартири).

Практична апробація алгоритму показала непогані результати застосування для вирішення поставленої задачі.

Висновки

Розв'язок однієї з основних задач стереозору – суміщення стереопар з використанням інфекційних алгоритмів є новаторським і цікавим.

Динаміка роботи алгоритму суттєво залежить від природи задачі, грубо кажучи, від «типу» сцени спостереження. Звичайно ж, дилема між швидкістю та якістю залишається відкритою. Так, застосовуючи «швидкі» правила переходу ми втрачаємо у якості відновленого віртуального зображення.

Не зважаючи на те, що інфекційний алгоритм добре зарекомендував себе для стереозображень, проблеми перешкод-об'єктів та однаково текстурованих областей залишаються нерозв'язаними. Тобто є місце для вдосконалення.

Запропонований інфекційний алгоритм може бути корисним також і в інших застосуваннях по роботі з зображеннями – всюди де є потреба когерентно поширювати інформацію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hollerung T. D. Epidemic Algorithms [Електронний ресурс] / T. D. Hollerung, P. Bleckmann. – Режим доступу : www2.cs.uni-paderborn.de/cs/ag.../2004SS/.../09-Epidemic-Algorithms.pdf.
2. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход : [пер. с англ.] / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.
3. Поляков А. Ю. Третье измерение фотографии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://3dmasterkit.ru/articles/article_1-2.
4. Конушин А. Геометрические свойства нескольких изображений. Компьютерная графика и мультимедиа [Электронный ресурс] : сетевой журнал. – Выпуск № 3(13)/2006. – Режим доступа : http://cgm.computergraphics.ru/content/view/141.
5. Bovik A. C. Handbook of Image and Video Processing [Електронний ресурс]. – Режим доступу : books.google.com.ua/books?isbn=0121197921.
6. Математическая игра «Жизнь» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : thejam.ru/games/matematicheskaya-igra-zhizn.html.
7. Хопкрофт Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Д. Хопкрофт, Р. Мотвани, Д. Ульман. – Второе издание. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2007. – 528 с.
8. Olague G. The Infection Algorithm: An Artificial Epidemic Approach for Dense Stereo Correspondence[Електронний ресурс] / G. Olague, F. Fernández, C. B. Pérez, E. Lutton // Artificial Life. – October 2006. – V. 12. – N. 4. – P. 593-615. – Режим доступу : portal.acm.org/citation.cfm?id=628327.628780.

© Глибовець М. М., Гороховський С. С.,
Михальчук В. О., 2011

Стаття надійшла до редколегії 31.04.2011 р.