

УДК 004.94

*В роботі розглянуто найбільш популярні комп'ютерні програми тривимірної візуалізації медичних зображень*

*Ключові слова: тривимірна модель, томографія, моделювання, програмні засоби*

*В работе рассмотрены наиболее популярные компьютерные программы трехмерной визуализации медицинских изображений, среди которых есть как коммерческие, так и системы с открытым доступом*

*Ключевые слова: трехмерная модель, томография, моделирование, программные средства*

*The paper discusses the most popular computer programs dimensional visualization of medical images*

*Keywords: three-dimensional model, tomography, modeling, software*

# СИСТЕМИ ТРИВИМІРНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

**О.Г. Кисельова**

Старший викладач

Кафедра лікувально-діагностичних комплексів\*\*

Контактний тел.: 050-443-02-82

E-mail: Olga.mmif@gmail.com

**Є.А. Настенко**

Доктор біологічних наук, професор\*

E-mail: nastenko@inbox.ru

**О.О. Швець\***

E-mail: olya\_shvets@i.ua

\*Кафедра медичної кібернетики та телемедицини\*\*

\*\*Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

## 1. Вступ

Використання зображень в медицині вже давно стало традицією в сучасній науці. При встановленні діагнозу та проведенні лікування, лікарі все дедалі більше покладаються на медичні зображення, до яких відносяться рентгенограми, результати ультразвукових досліджень (УЗД), магніто-резонансної томографії (МРТ), комп'ютерної томографії (КТ), томографії на позитивному випромінненні тощо [1].

Тривимірні зображення внутрішніх органів людини стали використовувати на початку 90-х років після появи в комп'ютерних томографах потужних обчислювальних систем, здатних до обробки двовимірних зрізів. Сьогодні ж, тривимірне представлення елементів зони діагностичного інтересу є звичайним кожноденним процесом практично в усіх клініках світу [2]. При цьому, алгоритм перетворення двовимірних результатів діагностичного обстеження у тривимірну модель може бути програмно реалізованим як частина програмного продукту, що поставляється з відповідним апаратним комплексом, так і у вигляді незалежного програмного забезпечення.

## 2. Програмні засоби перетворення двовимірних медичних зображень у тривимірні

Спосіб тривимірного представлення діагностичних даних пов'язаний з потужними апаратними можливостями, які представляють можливим отримання паралельних, або розташованих під певним, заздалегідь відомим, кутом, магніто-резонансних, рентге-

нівських або ультразвукографічних зрізів з їх наступним об'єднанням в єдиний візуальний масив, в якому «прозорість» елемента зображення визначається, наприклад, його ехогенністю [3]. Саме тому, при побудові тривимірних зображень, основним завданням є перехід від набору комп'ютерних зрізів у двовимірному форматі (2D), які було отримано в результаті проведення медичних діагностичних обстежень різного виду, у тривимірний формат (3D) об'єктів. Для вирішення цієї задачі на ринку програмного забезпечення існує багато програм, серед яких є програми з відкритим доступом, а також комерційне програмне забезпечення.

### 2.1. Огляд «відкритого» програмного забезпечення

Існує багато видів «відкритого» програмного забезпечення для візуалізації медичних зображень. Але тільки маленька частина з нього використовується в медичних закладах.

Це пов'язано з тим, що майже всі системи такого типу не мають технічної підтримки після випуску продукту, що є дуже незручним при застосуванні. Розглянемо декілька «відкритих» систем.

#### Система 3D Slicer

Система 3D Slicer це вільний, відкритий пакет програмного забезпечення для візуалізації та аналізу зображень. 3D Slicer є доступним на декількох платформах (Windows, Linux і Mac OS) [4].

Система 3D Slicer включає у себе функціональні можливості для сегментації, реєстрації і тривимірної візуалізації змішаних зображень, а також деякі інші функції. Система включає підтримку стандартних форматів файлів зображень. До основних можливостей системи 3D Slicer можна віднести:

1) обробка зображень DICOM і читання/запис інших форматів (JPEG, GIF, PNG, TIFF, MPG та ін.);

2) інтерактивна візуалізація об'ємних воксель-зображень, полігональні сітки і обсяг візуалізації;

3) автоматична сегментація зображення;

4) аналіз та візуалізація даних тензора дифузії зображень.

Крім створення 3D-моделей зі звичайних томографічних зображень, 3D Slicer використовується також для представлення інформації, отриманої від МРТ (з використанням МРТ для оцінки кровотоку в мозку, що пов'язані з нейронною спинномозковою діяльністю). Наприклад, пакет DTMRI (Diffusion Magnetic Resonance Imaging) системи 3D Slicer дозволяє перетворювати та аналізувати зображення DTI (Diffusion Tensor Imaging). Результати такого аналізу можуть бути інтегровані з результатами аналізу морфологічних МРТ, МРА (магнітно-резонансна ангиографія). Інші види використання 3D Slicer включають нейрохірургічне планування.

#### *Система ITK-SNAP*

ITK-SNAP - це програмне забезпечення, що використовується для сегментації структур в 3D медичних зображень. Вона забезпечує напівавтоматичну сегментацію з використанням активних методів контуру, а також керівництвом розмежування та навігації. На додаток до цих основних функцій, система ITK-SNAP забезпечує ряд допоміжних утиліт. Деякі з основних переваг ITK-SNAP включають:

1) ручну сегментацію в трьох ортогональних площинах одночасно;

2) легкий для користувача інтерфейс для вибору параметрів активної сегментації контуру;

3) підтримка різних форматів 3D-зображення, в тому числі NIfTI (Neuroimaging Informatics Technology Initiative);

4) підтримка можливості одночасного перегляду і сегментації кількох зображень;

5) обмежена підтримка для кольорових зображень (наприклад, карти тензора дифузії);

6) інструмент «3D cut-plane» для швидкої обробки результатів сегментації.

#### *Система VTK*

Visualization Toolkit (VTK) є вільно доступним програмним забезпеченням з відкритим вихідним кодом для 3D комп'ютерної графіки, обробки зображень та візуалізації. Система VTK складається з бібліотеки класів C++ і кількох інтерпретуючих інтерфейсів, в тому числі Tcl / Tk (Tool Command Language), Java, Python і Kitware, чия команда створена і продовжує розширювати інструментарій, пропонує професійну підтримку та консультаційні послуги для VTK. Ця система підтримує широкий спектр алгоритмів візуалізації, в тому числі: скалярні, векторні, тензорні, текстурні та об'ємні методи і передові методи моделювання, такі як неявне моделювання, триангуляція Делоне тощо.

Система VTK інтегрується з різними базами даних на інструментаріях GUI, такими як Qt і Tk. VTK є крос-платформним і працює на Linux, Windows, Mac і Unix платформах [6].

## **2.2. Огляд комерційного програмного забезпечення**

#### *Система 3D-Doctor*

Система 3D-Doctor - це передова система програмного забезпечення для 3D-моделювання, обробки зображень і вимірювання результатів МРТ, КТ, ПЕТ (позитронно-емісійна томографія), мікроскопії, а також для наукових і промислових методів візуалізації.

3D-Doctor підтримує відтинки сірого та кольорового у зображеннях, що зберігаються в форматах DICOM, TIFF, Interfile, GIF, JPEG, PNG, BMP, PGM, MRC, RAW або інших.

3D-Doctor підтримує збереження результатів моделювання у форматах STL (Standard Template Library) (ASCII і бінарні), AutoCAD DXF (Drawing Exchange Format), IGES (Initial Graphics Exchange Specification), 3DS, OBJ (Object), VRML (Virtual Reality Modeling Language), PLY (Polygon File Format), XYZ та інших, які застосовуються для хірургічного планування, моделювання, кількісного аналізу, аналізу методом кінцевих елементів (МКЕ) і швидкого створення прототипів застосування.

До основних можливостей системи 3D-Doctor можна віднести: наявність інструментів сегментації; експорт 3D-моделей для 3D друку, аналіз МКЕ, можливості анімації і візуалізації; можливість вимірювання і проведення кількісного аналізу; 3D візуалізацію у реальному часі з можливістю проведення рендеринга поверхні.

#### *Система Implant-Assistant*

Система Implant-Assistant - це модуль програмного комплексу CDI-Assistant, призначений для планування операцій щелепно-лицьової хірургії і дентальної імплантації. Комплекс складається з двох основних модулів: CT-Assistant та Implant-Assistant [7].

Модуль CT-Assistant призначений для підготовки даних, необхідних для планування операцій. Ця програма призначена для обробки комп'ютерного томографічного дослідження та підготовки даних для використання в програмі Implant-Assistant. На підставі різної щільності тканин у програмі можна створювати 3D-об'єкти щелеп, зубів, м'яких тканин, майбутніх ортопедичних конструкцій тощо, можливе експортування тривимірних моделей для їх подальшого прототипування.

Модуль Implant-Assistant призначений для планування операції дентальної імплантації, яка дозволяє лікарю отримати абсолютну точність діагностики клінічної ситуації та аналізу можливих результатів лікування.

Implant-Assistant надає можливість оптимально вибрати і розташувати імплантант у кістковій тканині й оптимізувати його положення щодо майбутньої ортопедичної конструкції.

В системі Implant-Assistant можна отримати будь-які перетини щелеп, зробити вимірювання з точністю до 0,01 мм, визначити кількісний склад і щільність кісткової тканини, трасувати нижньощелеповий і різцевий нерви, побачити внутрішню анатомію придаткових вазух і зубів (наявність додаткових пульпарних виходів, анастомозів, звужень тощо).

На точній 3D-моделі щелепи можна перевірити співвідношення імплантатів з рельєфом кісткової тканини, природними зубами, майбутньою орто-

педичною конструкцією та судинно-нервовими пучками.

Програма містить базу даних дентальних імплантантів, де можна підібрати необхідний імплантат і супраструктуру. Дає змогу доповнити базу даних імплантантів програми Implant-Assistant різними системами дентальних імплантантів гвинтового типу.

Вихідними даними для програмного комплексу CDI-Assistant є серія зрізів, отримана за допомогою комп'ютерно-томографічного дослідження і представлена у вигляді набору файлів формату DICOM. Модуль CT-Assistant вилучає і перетворює з DICOM файлу дані, необхідні для планування операції, такі як зображення зрізу, положення та орієнтація зрізу в просторі, роздільна здатність зображення, дані про пацієнта, дата дослідження тощо. Витягнуті дані перетворюються у внутрішній формат програми. За допомогою інструментів виділення областей і обчислення тривимірних моделей, користувач створює об'єкти, необхідні надалі при плануванні операції, такі як щелепа, зуби, протез тощо.

Підготовлені дані завантажуються модулем Implant-Assistant, який містить повний набір необхідних інструментів для планування операції.

Після завершення планування операції, дані завантажуються модулем CT-Assistant. Модуль CT-Assistant дозволяє експортувати тривимірні моделі у формат STL (stereolithography) для подальшого прототипування. На основі даних про розташування імплантантів комплекс CDI-Assistant створює направляючі імплантологічні шаблони.

Імплантологічний шаблон використовується лікарем при операції, для точної постановки імплантату в заплановане положення.

Всі права на даний продукт належать Центру Дентальної Імплантації.

#### *Система SimPlant*

Система SimPlant є одним з продуктів розробки програмного забезпечення компанії Materialise [8].

SimPlant - це програмне забезпечення точного доопераційного планування, яке забезпечує підвищений рівень конфіденційності і додаткову безпеку для пацієнтів. План створюється для ідеального розташування імплантату в 2D- і 3D-зображеннях з урахуванням клінічних та естетичних міркувань.

Програма SimPlant, як навчальний посібник, може продемонструвати пацієнтам передопераційний план, тим самим, збільшуючи їх кількість і домагаючись їх розуміння. SimPlant також постійно збільшує медичні / юридичні вимоги, надаючи точну ділову документацію. Крім того, попереднє планування з SimPlant економить час і гроші, ефективно зменшує час операції і поліпшує керування списками, що містять специфікації спеціальних імплантантів для використання.

Для обробки можна завантажувати всі можливі формати файлів зображень.

Основні функціональні можливості:

1) У програмі SimPlant доступні традиційні аксіальні, сагітальні і корональні зображення.

2) Програма пропонує тривимірну візуалізацію імплантату разом з кісткою протеза, що сканується, або шаблон сканування нижньощелепного нерва.

3) Програмне забезпечення є інструментом для швидкого взаєморозуміння між хірургом, стоматологом, зубної лабораторією, пацієнтом.

4) Друк звітів з даними пацієнта, специфікацій імплантантів, 2D- і 3D-зображень у чорно-білому або кольоровому варіанті.

5) Вимірювання щільності і розмірів кістки, збільшення контрасту, масштабування вікна, панорамування.

6) Доступний перегляд поперечних зрізів і панорамних зображень.

Програмне забезпечення SimPlant доступне на 7 мовах (англійською, французькою, німецькою, італійською, японською, польською та іспанською мовами).

#### *Система MIMICS*

MIMICS (Materialise's Interactive Medical Image Control System) - програмне забезпечення компанії Materialise, яке дозволяє обробляти і редагувати 2D зображення (КТ, МРТ та ін) для побудови 3D-моделі з граничною точністю, гнучкістю і зручністю. Потужні інструменти сегментації дозволяють сегментувати медичні зображення, проводити дослідження прямо на 3D-моделі, широкий спектр вихідних форматів та інженерних додатків, такі, як МКЕ, дизайн, моделювання хірургічного втручання та багато іншого [9].

3D-дані з Mimics можуть бути використані в 3-Matic для виконання різних проектних і сітки операцій безпосередньо на анатомічних даних тим самим усуваючи необхідність у тривалих, схильних до помилок процесів зворотного проектування. Це дозволяє максимізувати точність і заощадити час. Анатомічні дані або конструкція можуть бути експортовані в будь-яку систему автоматизованого проектування, систему автоматизованого виробництва та систему аналізу методом кінцевих елементів роблячи 3-Matic прекрасним доповненням до звичайного робочого процесу.

Функціональні можливості Mimics:

1) накладання контуру і маски 3D-об'єкту та імплантати на зображення DICOM, а також експортувати DICOM файли з цих контурів для навігаційної системи.

2) можна завантажувати безліч форматів: DICOM, TIFF, Interfile, GIF, JPEG, PNG, BMP, PGM, MRC, RAW та ін.

3) дане програмне забезпечення може ставати під такі платформи, як: Windows XP, Windows Vista or 7.

Даний продукт є розробкою компанії Materialise (Бельгія) для просування біомедичних R&D (research and development).

#### *Система VGStudio Max*

VGStudio Max (VolumeGraphicsStudio Max) - це провідне рішення для промислового аналізу комп'ютерних томографічних даних [10].

Одне програмне забезпечення, яке вирішує все:

Geometry Analysis, material analysis (виявлення дефектів, сегментація, розподіл і положення в композиційних матеріалах), assembly analysis (вбудовані компоненти, складання та монтаж позиції).

Основні функції:

1) Візуалізація даних в вокселях з більш ніж 20 ГБ на 64 бітових комп'ютерів.

- 2) Комбіновані візуалізації КТ і полігон (САПР).
  - 3) Різні методи візуалізації.
  - 4) Стерео рендеринг, включаючи підтримку OpenGL (Open Graphics Library) стерео обладнанням.
  - 5) Обробка 3D-зображень.
  - 6) Можливості анімації.
  - 7) Аналіз даних та вимірювання.
  - 8) Повна підтримка multi-processor/multi-core системи.
  - 9) Фільтр: середній, гаусові, адаптивні гаусовських, градієнт, згортки, ерозія, дилатація, застосовується класифікація і т.д.
  - 10) Імпорт обсягів, зображення (TIFF, JPEG, JPEG2000, BMP, PPM), HDF даних, аналіз даних DICOM і вихідних даних. Імпорт полігональних даних (STL). Експорт даних RAW. Експорт зображення (TIFF, JPEG, BMP, PPM), DICOM, HDF, AVI. Експорт анімації як AVI або окремі кадри. Поверхня видобутку та експорту (STL, VRML - Virtual Reality Modeling Language) для швидкого створення прототипів і зворотних інженерних завдань.
- Підтримувані платформи: Windows XP Professional, 32 or 64 bit; Windows Vista, 32 or 64 bit; SuSE Linux Enterprise Desktop (SLED) 10, 32 or 64 bit; Mac OS X, 10.4 or 10.5.

### 3. Висновки

Програмні засоби побудови тривимірних медичних зображень представлені на ринку як комерційними, так і системами з відкритим доступом. Розробники відкритих систем, як правило, не надають технічної підтримки на свої продукти, а їх функціональна обмеженість зменшує можливість їх використання в клінічних закладах. Комерційні ж програмні продукти, як правило, включають у себе повний спектр алгоритмів сегментації, рендерінгу, а також віртуального планування хірургічних операцій, що є незамінним у лікарській практиці.

Спосіб тривимірного представлення діагностичних даних пов'язаний з потужними апаратними можливостями, які дають змогу отримання паралельних, або розташованих під певним, заздалегідь відомим, кутом, магніто-резонансних, рентгенівських або ультразвукографічних зрізів з їх наступним об'єднанням в єдиний візуальний масив.

Як і будь-яке програмне забезпечення, системи тривимірного моделювання діляться на системи комерційні та відкриті.

Відкрите програмне забезпечення широко не використовується в медичних закладах. Це пов'язано з

тим, що майже всі системи такого типу не мають технічної підтримки після випуску продукту. Такі програми використовують здебільшого в навчальному процесі та при проведенні науково-дослідних робіт.

Прикладами відкритих систем є програми Visualization Toolkit (VTK), 3D slicer, ITK-SNAP та ін. Серед них, з точки зору «дружності» інтерфейсу користувача, можна виділити програму VTK. Крім того, VTK включає у себе досить великий спектр алгоритмів тривимірної візуалізації та є багатоплатформеною системою. Також, дане програмне забезпечення підтримується технічними спеціалістами та консультантами, що не є властивим багатьом відкритим системам.

Система 3D Slicer надає функціональні можливості для тривимірної сегментації змішаних зображень, а також включає в себе алгоритми аналізу зображень для тензора дифузії. Програма ITK-SNAP забезпечує напівавтоматичну сегментацію з використанням активних методів контуру. Система VTK підтримує широкий спектр алгоритмів візуалізації, в тому числі скалярні, векторні, тензорні, текстурні та об'ємні методи моделювання. Комплекс MeshValmet використовується для хірургічного планування, моделювання, кількісного аналізу, аналізу методом кінцевих елементів та швидкого створення прототипів.

До найбільш відомих комерційних систем моделювання тривимірних медичних зображень можна віднести системи Mimics (Materialise), 3D-Doctor (Able Software), VGStudio Max (Volume Graphics) та ін.

Системи MIMICS та 3D-Doctor мають можливості обробки та редагування двовимірних зображень для побудови тривимірних (3D) моделей з граничною точністю, гнучкістю і зручністю, а потужні інструменти сегментації дозволяють сегментувати медичні зображення та проводити дослідження прямо на 3D-моделях. Програмне забезпечення Mimics має додаткові можливості по плануванню та симуляції операцій на тривимірних моделях.

Програмний комплекс Implant-Assistant (права на який належать російській компанії «Центр дентальної імплантології») призначений для планування операцій щелепно-лицьової хірургії і дентальної імплантації.

Продукт SimPlant (Materialise) забезпечує зв'язок між запланованою та фактичною операцією, точно передаючи змодельований план операції.

Програмний продукт VGStudio Max (Volume Graphics) представляє собою систему для промислового аналізу комп'ютерних томографічних даних з метою виявлення дефектів, проведення сегментації, визначення положення і розподілу в композиційних матеріалах.

### Література

1. Патент U2011 00988 Україна. Спосіб інтегрованого тривимірного моделювання біомедичних об'єктів / Бубнов Р.В. (вх. 775247, 31.01.2011), Патент U 2011 02898 Україна. Спосіб стереоскопічних зображень біомедичних об'єктів / Бубнов Р.В., Кисельова О.Г. (вх. 790312, 12.03.2011).
2. Lexzi R., Ritch R., Walsh J.B. et al. Personal computer-based 3-dimensional ultrasound biomicroscopy of the anterior segment. Arch. Ophthalmol., 1996 May; 114(5): 520-4.



3. Von Birgelen C., Serruys P.W., de Feyter P.J. et al. Electrocardiogram-gated intravascular ultrasound image acquisition after coronary stent deployment facilitates online three-dimensional reconstruction and automated lumen quantification. J. Am. Coll. Cardiol., 1997 Aug; 30(2): 436-43.
4. <http://www.slicer.org/>.
5. <http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php>.
6. <http://www.vtk.org/>.
7. <http://implant-assistant.ru/>.
8. <http://www.materialise.com/materialise/view/en/2970306-SimPlant.html>.
9. <http://www.materialise.com/mimics>.
10. <http://volumegraphics.de/products/vgstudiomax/index.html>.

□      □

**Сформована цільова функція щодо визначення пріоритетності відправлення поїздів з залізничних станцій**

*Ключові слова: обіг вантажного вагону, елементи обігу, термін доставки, відстань прямування, цільова функція*

---

**Сформирована целевая функция для определения приоритетности отправления поездов с железнодорожных станций**

*Ключевые слова: оборот грузового вагона, элементы оборота, срок доставки, расстояние следования, целевая функция*

---

**Formed objective function to determine the priority of sending trains from railway stations**

*Key words: turnover of freight cars, circulation elements, delivery time, movement distance, target function*

□      □

УДК 656.025:510.223

# ВИЗНАЧЕННЯ ЦІЛОВОЇ ФУНКЦІЇ ПРІОРИТЕТНОГО ВІДПРАВЛЕННЯ ВАНТАЖНИХ ПОЇЗДІВ ЗІ СТАНЦІЇ

**О.В. Лаврухін**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра управління експлуатаційною роботою  
Українська державна академія залізничного транспорту  
пл. Фейєрбаха, 7, м. Харків, Україна, 61050  
Контактний тел.: (057) 730-10-88  
E-mail:creattel@mail.ru

## Вступ

Одним з основних експлуатаційних показників залізничного транспорту, який характеризує якість його роботи та вважається невід'ємним елементом технічного нормування роботи залізничних підрозділів є обіг вантажного вагону. В наукових роботах [1] зазначається той факт, що на даний момент цей показник використовують лише як звітний і фактично не використовується в оперативній роботі.

Відповідно до цього доцільно розглянути можливість використання параметру обігу вантажного вагону та його елементів не тільки як звітних але як оперативних показників, які будуть відтворювати не тільки рівень якості використання рухомого складу (вантажних вагонів) але й характеризувати економічну ефективність від здійснення перевезень.

## Аналіз досліджень

З цією метою доцільно дослідити класичну трьохчлену формулу обігу вантажного вагону [2]:

$$O_v = \frac{1}{24} \left[ \frac{l_o}{v_d} + \frac{l_o}{L_{tex}} t_{tex} + k_m t_b \right], \tag{1}$$

де  $l_o$  – повний рейс вагону, км;  
 $v_d$  – середня дільнична швидкість, км/год;  
 $L_{tex}$  – вагонне плече (характеризує відстань пробігу вагонів між технічними станціями на яких відбувається технічне обслуговування), км;  
 $t_{tex}$  – середній простій вагонів на одній технічній станції, год.;  
 $k_m$  – коефіцієнт місцевої роботи;  
 $t_b$  – середній простій вагона, що приходить на одну вантажну операцію, год.