

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кнігавко Юрій Володимирович

УДК 617.52-089.844:004.94

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОМП'ЮТЕРНОГО ПЛАНУВАННЯ
ПЛАСТИЧНИХ ВТРУЧАНЬ НА ОБЛИЧЧІ ЛЮДИНИ**
Спеціальність 05.11.17 – Біологічні та медичні прилади та системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: **Аврунін Олег Григорович**, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Офіційні опоненти: **Кіпенський Андрій Володимирович**, доктор техн. наук, професор, декан факультету інтегральної підготовки, професор кафедри промислової та біомедичної електроніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Павлов Сергій Володимирович, доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи, завідувач кафедри фізики та фотоніки Вінницького національного технічного університету.

Захист відбудеться « » 2015 р. о ⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.052.05 у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14, корпус 1, зал засідань.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий « » _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор техн. наук, доцент

І.В. Лисицька

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Людське обличчя є найваріативнішою частиною людського тіла. Саме обличчя є тим елементом зовнішності людини, у результаті сприйняття якого відбувається ідентифікація окремої особистості.

Анатомічні структури, що розташовані на ділянці обличчя людини, крім формування її зовнішнього естетичного образу, виконують також і ряд важливих функціональних задач, забезпечуючи нормальний перебіг фізіологічних процесів у організмі. При побудові плану хірургічного втручання функціональним характеристикам оперованих органів має бути приділено не меншу увагу, ніж естетичній складовій операції такого втручання.

Пластична медицина сьогодні - це галузь науки, що дуже стрімко розвивається. Кількість проведених операцій на обличчі людини постійно збільшується, але проблема комп'ютерного планування таких операцій залишається, як і раніше, актуальною. Комплексне комп'ютерне планування пластичних втручань на обличчі людини, яке ґрунтується на використанні сучасних засобів інтроскопії, враховує естетичні уподобання пацієнта щодо своєї нової зовнішності і дає змогу оцінити функціональні характеристики верхніх дихальних шляхів, сприяє підвищенню рівня якості передопераційного планування хірургічних втручань.

Підвищення якості передопераційного планування пластичних втручань може бути досягнуто завдяки використанню методів 3D візуалізації структур, які підлягають пластичній корекції. Дані для побудови таких моделей можуть бути отримані в результаті комп'ютерних томографічних досліджень. Як джерело вихідних даних можуть також виступати результати фотограмметрії. Крім високоточної візуалізації структур і тканин обличчя і верхніх дихальних шляхів, розширення можливостей комп'ютерного передопераційного планування може здійснюватися шляхом модифікацій віртуальних моделей, що відображаються. Метою подібних змін, що проводяться з тривимірними віртуальними моделями, є прогнозування результату операції до її проведення. Отже, створення і вдосконалення методів і програмних засобів, що дозволяють здійснювати корекцію отриманих 3D моделей, є актуальним напрямком покращення результатів пластичної хірургії і важливим завданням сучасної естетичної медицини.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана згідно з планом наукового напрямку кафедри біомедичної інженерії ХНУРЕ у відповідності до держбюджетної тематики: «Дослідження теоретичних і технічних принципів оцінки стану людини, профілактики, лікування і реабілітації» № д / р 0107U001541 і «Дослідження теоретичних і технічних принципів діагностики, оцінки та корекції медико-соціального стану людини» № д / р 0110U002532; в рамках договору № 360 / 08-11 від 04.01.2011 р про науково-технічне співробітництво з кафедрою оториноларингології Харківського національного медичного університету за темою «Медикаментозні та немедикаментозні фактори в реабілітації хворих

Лор-патологією та асоційованих з нею соматичних захворювань» № д / р 0108U005253.

Метою роботи є розробка нових методів і засобів комп'ютерного планування пластичних втручань на обличчі людини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих методів і програмних засобів для комп'ютерного планування пластичних хірургічних втручань на обличчі людини і оцінки морфологічних та (або) функціональних характеристик ділянок обличчя, що підлягають пластичній корекції.

2. Розробити метод комп'ютерного планування функціонально-естетичних хірургічних втручань на обличчі людини на основі даних комп'ютерної томографії та фотограмметрії з метою прогнозування функціонального результату операції при коригуванні анатомічних структур.

3. Розробити метод об'ємної деформації створених воксельних віртуальних моделей анатомічних структур для проведення віртуальної модифікації цих моделей з урахуванням механічних властивостей біологічних тканин.

4. Розробити метод комп'ютерного планування пластичних втручань, який дозволить проводити просторові деформації полігональної моделі поверхні анатомічних структур, а також забезпечити реалістичну візуалізацію структури верхніх дихальних шляхів і обличчя людини з виконанням оцінки функціональної достатності цих дихальних шляхів.

5. Сформулювати медико-технічні вимоги та практичні рекомендації до системи комп'ютерного планування пластичних хірургічних втручань на обличчі людини.

Об'єкт дослідження: процес комп'ютерного планування хірургічних втручань на обличчі людини.

Предмет дослідження: методи та засоби комп'ютерного планування хірургічних втручань на обличчі людини.

Методи дослідження: методи алгоритмізації та програмування, методи диференціального числення, аналітичної геометрії, лінійної алгебри; методи теоретичної фізики і аеродинаміки, методи математичного моделювання фізіологічних процесів у біологічних об'єктах, методи статистичної обробки результатів експерименту та дискримінантного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів:

Вперше розроблено метод комп'ютерного планування функціонально-естетичних хірургічних втручань, який, за рахунок побудови і деформації моделей обличчя і носової порожнини людини з урахуванням даних комп'ютерної томографії та фотограмметрії, дозволяє виконувати прогнозування функціонального результату операції при коригуванні анатомічних структур.

Отримав подальший розвиток метод об'ємної деформації віртуальної моделі анатомічних структур, який відрізняється від існуючих аналогів використанням математичної моделі системи взаємопов'язаних елементів томографічного об'єму, та дає можливість за рахунок використання цієї

математичної моделі, виконувати віртуальну модифікацію моделей анатомічних структур з урахуванням механічних характеристик біологічних тканин.

Удосконалено метод просторової деформації полігональної моделі анатомічних структур, що відрізняється від відомих можливістю реалістичної візуалізації моделей обличчя і верхніх дихальних шляхів пацієнта, та дозволяє на основі застосування моделі деформуючого інструменту, виконувати в інтерактивному режимі модифікацію структур верхніх дихальних шляхів і обличчя людини при проведенні комп'ютерного планування хірургічних втручань.

Вперше розроблено метод оцінки функціональних характеристик повітряноносних шляхів на основі побудови віртуальних моделей цих шляхів.

Обґрунтування і достовірність результатів роботи базується на аналізі літературних джерел та підтверджуються збігом результатів експериментальних і теоретичних досліджень, а також реалізацією результатів в умовах реального передопераційного планування.

Практична значущість отриманих результатів. Отримані наукові результати мають практичне значення, що підтверджується патентом і актами впровадження результатів досліджень.

Розроблено розрахунково-графічне програмне забезпечення (ПЗ) в вільно-розповсюдженому середовищі Microsoft Visual Studio 2012 Express Edition. Використання розробленого ПЗ дозволяє виконувати реалістичну візуалізацію анатомічних структур, деформацію побудованих віртуальних моделей та розрахунок функціональної інформації для прогнозування результатів функціонально-естетичних хірургічних втручань.

Визначені основні медико-технічні вимоги та обґрунтовані практичні рекомендації для проведення комп'ютерного планування функціонально-естетичних ринохірургічних втручань.

Результати дисертаційної роботи впроваджені і використані в науково-дослідній роботі з держбюджетної теми № 247-1 «Дослідження теоретичних основ та принципів діагностики верхніх дихальних шляхів» (2010-2012 рр.) Харківського національного університету радіоелектроніки.

Розроблений спосіб комп'ютерного планування ринологічних функціонально-естетичних оперативних втручань був впроваджений при викладанні матеріалу дисципліни «Оториноларингологія» у розділі «Функціональні методи дослідження ЛОР-органів» на кафедрі оториноларингології в Харківському національному медичному університеті.

Розроблене програмне забезпечення пройшло попередню клінічну апробацію в оториноларингологічному відділенні Харківського обласного центру екстреної медичної допомоги та медицини катастроф.

Принципи побудови, методи обробки та аналізу інтроскопічних даних, алгоритмічна модель, структурна схема і основні медико-технічні вимоги для проектування систем комп'ютерного планування ринохірургічних втручань використовуються при читанні дисциплін «Методи обробки біомедичних зображень», «Засоби комп'ютерного аналізу біомедичних даних та

зображень», «Методи обробки біомедичних сигналів і даних» на кафедрі біомедичної інженерії ХНУРЕ.

Особистий внесок здобувача. Дана робота ґрунтується на результатах дисертаційних досліджень, описаних в роботах [1-16], з яких публікації [2, 4, 6, 9, 12, 13] написані самостійно. Публікації [1, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 14-16] були виконані у співавторстві. У роботах, написаних у співавторстві, здобувачеві належить: в [11] - програмна реалізація алгоритму полігональної растеризації, яка використовується для просторового відображення біооб'єктів, що моделюються, в [3] – програмна імплементація алгоритму просторової візуалізації елементів томографічного датасету, в [5] - фізична модель взаємодії елементів покривів шкіри, відображених на томографічних знімках, в [7] - ітеративна процедура розрахунку функціональних показників носового дихання, що визначає достатність вентиляції легень, в [8] - метод розрахунку діаметра трубки Вентурі, яка використовується в пристроях вимірювання функції зовнішнього дихання, в [10] - підбір та реалізація методів візуалізації томографічних даних голови пацієнта, що є найбільш інформативними при проведенні комп'ютерного планування пластичного втручання, в [11] - метод полігональної деформації для формування віртуальної моделі, яка відповідає очікування пацієнта, в [14] - методи геометричної оптимізації полігональних моделей біооб'єктів, в [15] - метод деформації поверхні полігональної моделі обличчя, в [16] - набір методів просторової візуалізації анатомічних структур, що підлягають ринологічному втручання.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях: 19, 20-й міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2011-2012 рр), 11-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики і моделювання» (Харків, 2011), міжнародній науково-практичній конференції «Силовa електроніка та енергоефективність» (Алушта, 2010-2012 рр), міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (Харків, 2011, 2014 г), міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» (Харків, 2012, 2013рр), а також на наукових семінарах кафедри біомедичної інженерії (2009-2014 рр).

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були опубліковані у 16 наукових працях, з яких 8 - статті (7 у професійних виданнях ВАК України, 1 у періодичному іноземному виданні, що входить до наукометричних баз), 7 тез доповідей та патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаної літератури. Дисертаційна робота викладена на 176 сторінках, із них 160 сторінок основного тексту, та містить рисунків, таблиць,найменувань у списку використаної літератури на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить у собі загальну характеристику роботи, обґрунтування її актуальності, формулювання мети і основних завдань дослідження, визначення об'єкта, предмета і методів дослідження, наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, перерахування публікацій і опис особистого внеску здобувача в роботи, виконані у співавторстві. У вступі наведено відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи і про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У **першому розділі** наведено аналітичний огляд літератури за темою дослідження.

Описана роль пластичної хірургії у сучасному суспільстві та проблеми, які вирішуються цією галуззю медичної науки. Обґрунтована необхідність застосування передопераційного планування в хірургічній практиці, а також вказані переваги, які пов'язані зі застосуванням такого планування у клінічному процесі і сприяють підвищенню якості планування хірургічного втручання.

Проведений аналіз показує, що комп'ютерне планування естетичних втручань, яке проводиться пластичними хірургами, нерідко ґрунтується на аналізі та комп'ютерній обробці фотознімків обличчя пацієнта в ключових ракурсах, що дозволяє оцінити геометрію обличчя. Часто такої інформації недостатньо. Якщо в ділянку хірургічного втручання залучаються органи, що мають важливе функціональне призначення, складну будову, або структурну патологію, то у дослідженні треба використовувати методи комп'ютерної томографії оскільки її результати несуть в собі інформацію про внутрішню структуру органів, що досліджуються.

Проведено огляд доступного програмного забезпечення, яке може бути використане пластичним хірургом на етапі передопераційної підготовки. Відзначено якісний ривок у можливостях подібних програмних засобів, що стався за останнє десятиріччя і який обумовлений як підвищенням обчислювальних потужностей персональних комп'ютерів так і поширенням засобів інтроскопії, зокрема апаратів СКТ третього та четвертого покоління. Розглянуто можливості таких програмних засобів, як Sante CT Viewer 3D, 3DimViewer, 3D-Doctor, Synapse 3D, OsiriX.

Зазначено основні алгоритми, які використовуються для побудови тривимірних полігональних моделей за томографічними зрізами (Marching Cubes, Marching Tetrahedrons, MT6, алгоритми Скала і Канейра). Описані проблеми геометричного та біофізичного моделювання анатомічних структур обличчя, серед яких окремо слід відзначити складність побудови індивідуальної карти тканин обличчя за результатами томографії, що пов'язане з неможливістю однозначного розпізнавання типів тканин за їх щільністю на томографічних знімках.

На основі проведеного аналізу обґрунтовані напрями досліджень, необхідні для реалізації мети дисертаційної роботи, та визначено завдання цих досліджень.

Другий розділ дисертації присвячений розробці основ для створення віртуальних моделей обличчя і верхніх дихальних шляхів людини за рахунок багатоетапної обробки томографічних даних. Оскільки методи передопераційного комп'ютерного планування пластичних втручань, ґрунтуються на зміні віртуальних моделей, то в цьому розділі особлива увага приділятиметься методам модифікації таких моделей. Також у другому розділі описані методи, які покращують характеристики візуалізації програмно сформованих полігональних та об'ємних моделей.

Другий розділ містить огляд особливостей зберігання томографічних зрізів в файлах формату DICOM. Цей формат є основним стандартом для зберігання і передачі масивів інтроскопічних інформації. Кожний зріз, який одержується за допомогою томографічних досліджень, описується окремим DICOM файлом. Вся інформація зрізу (растр, його піксельна роздільна здатність, розрядність, фізичні розміри, інформація про пацієнта, проведене дослідження, інтроскопічний апарат, лікаря-діагноста і таке інше) зберігається в спеціальних інформаційних полях файлу. Фактично DICOM файл є сукупністю інформаційних елементів, що були послідовно записані.

На етапі завантаження томографічного датасета доцільно застосовувати операцію поблочного стиснення даних, основна мета якого - зменшити обсяг пам'яті, що витрачається для зберігання масиву вокселів. Для кращого візуального сприйняття інтроскопічних зображень, розрядність яких більша за 8 біт на піксель, зазвичай корисно використовувати процедуру тональної компресії. Тональна компресія виконується у відповідності з наступним виразом:

$$I_D = W_{DL} + \frac{(I_S - W_{SL}) \cdot (W_{DR} - W_{DL})}{W_{SR} - W_{SL}},$$

де I_D – яскравість елемента зображення після проведення компресії, I_S – яскравість пікселя до компресії; $[W_{DL}..W_{DR}]$ - тональний діапазон вхідного зображення; $[W_{SL}..W_{SR}]$ - тональний діапазон вихідного зображення.

Важливою задачею при автоматизованій обробці томографічних даних є їх сегментація. В ході цієї операції відбувається визначення того, які пікселі несуть в собі інформацію про величину поглинання рентгенівського випромінювання досліджуванним об'єктом, а які до цього об'єкту не відносяться (тобто є фоном зображення або відповідають порожнечам всередині досліджуваної частини об'єкта). Виділення області інтересу на томографічних знімках і класифікація тканин пацієнта реалізується в ході сегментації за рахунок порогової заливки або заливки пов'язаних областей (рис. 1).

Після виконаної сегментації настає черга етапу виділення контурів сегментованих областей. Усі пікселі, що лежать на межі виділених областей, позначаються особливим значенням у допоміжному масиві ланцюгових кодів. Значення елементів цього масиву розраховуються у відповідності з наведеною нижче формулою:

$$B(x, y, z) = \sum_{i=0}^7 2^{\left\lfloor \frac{\text{ang}(x_i - x, y_i - y) \cdot 4}{\pi} \right\rfloor} \cdot \left| \frac{A(x_i, y_i, z)}{C} \right|$$

де i - номер пікселя (x_i, y_i, z) у масиві восьмизв'язного оточення даного пікселя (x, y, z) ; $\text{ang}(dx, dy)$ – функція, що обчислює кут нахилу контурного відрізка, відповідно до наступної формули:

$$\text{ang}(dx, dy) = \begin{cases} \arctg \frac{dy}{dx}, dx > 0, dy > 0; \\ \arctg \frac{dy}{dx} + \pi, dx < 0; \\ \arctg \frac{dy}{dx} + 2\pi, dx > 0, dy < 0, \end{cases}$$

де $dx = x_i - x$; $dy = y_i - y$.

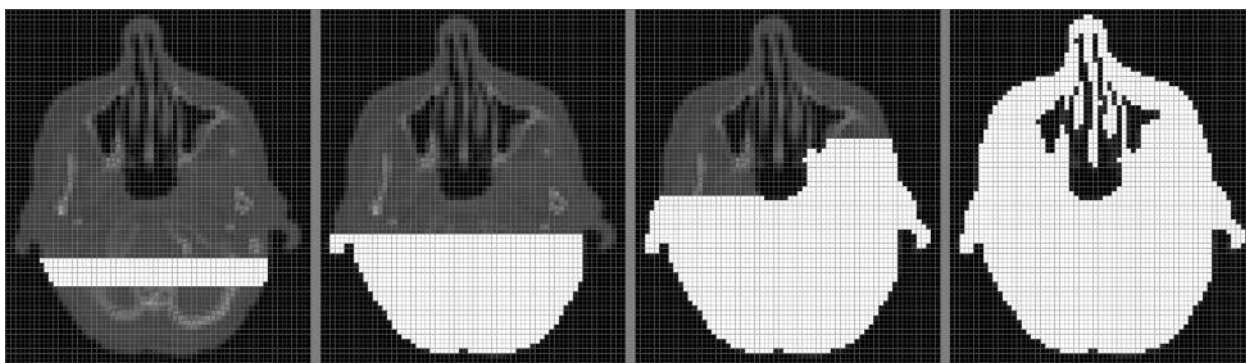


Рисунок 1 – Етапи виділення тканин голови пацієнта на томографічних знімках

При обробці масиву ланцюгових кодів зрізу (рис. 2а) формується контурна ламана лінія, яка є межею біооб'єктів, що вивчаються (рис. 2б, в).

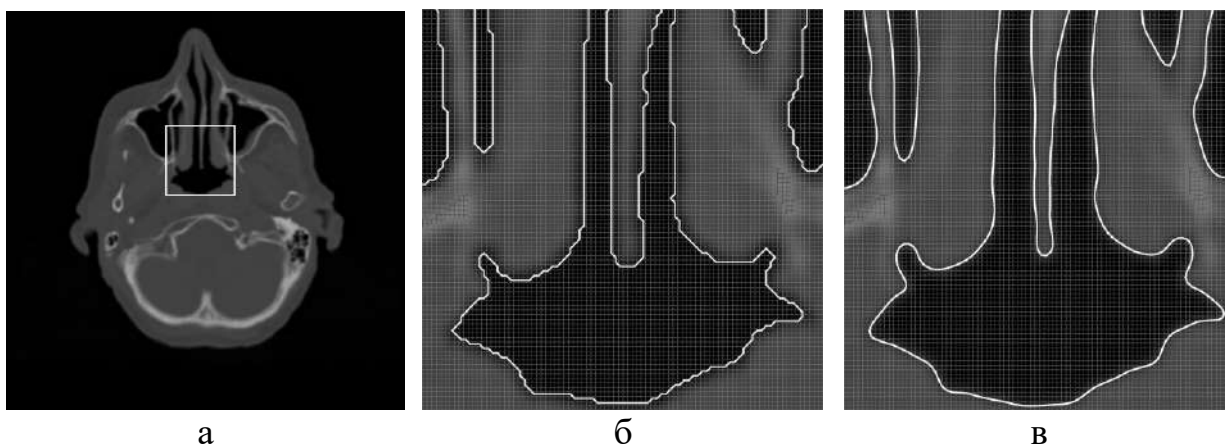


Рисунок 2 – Виділення контурів верхніх дихальних шляхів пацієнта на томографічному зрізі

Ця контурна лінія в подальшому використовується для обчислення геометричних характеристик біооб'єктів, що моделюються, і є основою для створення тривимірної контурної моделі (рис. 3а, б). Операція виділення

контурів і побудови контурної моделі може проводитися у 3 основних ортогональних площинах (рис. 3в).

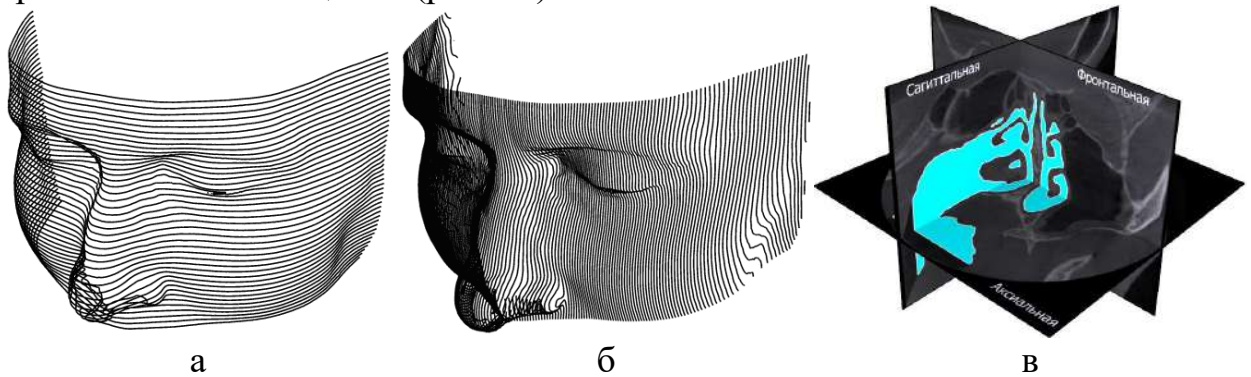


Рисунок 3 – Результати виділення контурів

а) в аксіальній проекції; б) у сагітальній проекції; в) у трьох основних проекціях.

Крім побудови контурних моделей верхніх дихальних шляхів та обличчя пацієнта в розділі описано створення просторових віртуальних моделей за допомогою тривимірної вокселізації та з використанням алгоритму "Marching Cubes" (рис. 4а, б). Описана організація модифікованого графічного конвеєра, що використовується у роботі для візуалізації отриманих полігональних моделей.

Також розглянута розроблена автором програмна реалізація об'ємної візуалізації томографічних даних методом відкидання променів (рис. 4 в).

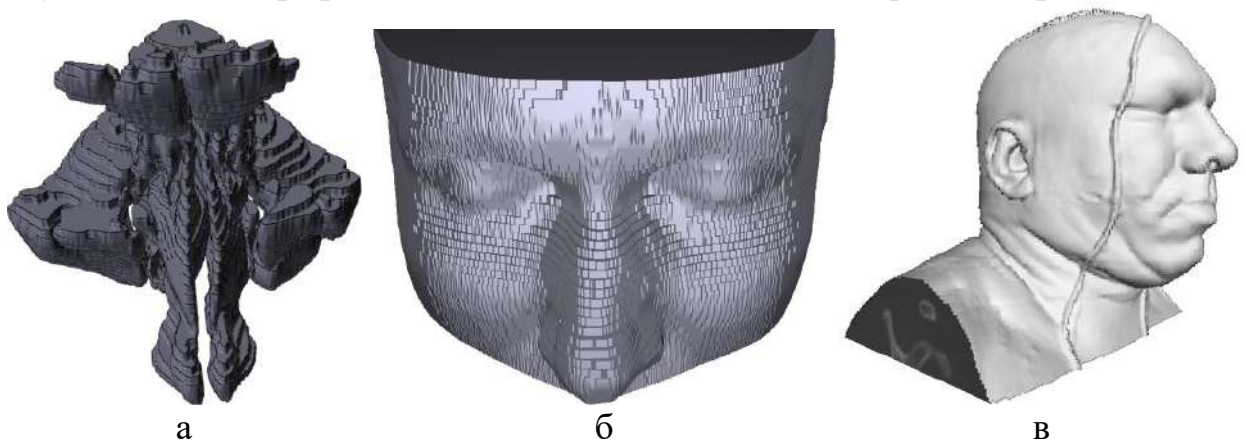


Рисунок 4 – Візуалізація анатомічних структур обличчя людини по томографічних даними

Третій розділ присвячений розробці методів і алгоритмів корекції комп'ютерних моделей обличчя і верхніх дихальних шляхів людини при підготовці пластичних хірургічних втручань.

Автором пропонується метод комп'ютерного планування пластичних втручань, заснований на змінах об'ємних томографічних даних. Запропонований метод розглядає набір томографічних зрізів як тривимірну структуру, що складається з великої кількості взаємопов'язаних вокселів, які відповідають виділеним в ході сегментації ділянкам інтроскопічних зображень (рис. 5а). У початковому стані сусідні воксели датасету не

прилягають щільно один до одного, а розділяються порожнім простором. Зміна положення одного вокселя призводить до зміни положення інших елементів об'ємного датасета, за рахунок зв'язків кожного вокселя з двома сусідніми вокселями у кожному вимірі. Таким чином, кожен воксель може мати в цілому до 6 таких сусідів у тривимірному датасеті. Можливий взаємозв'язок елементів одного зрізу в системі з 10 вокселів схематично відображено на рис. 5б.

Характер з'єднання і взаємодії вокселів може бути різним. У роботі запропонована модель, в якій вокселі з'єднуються між собою за допомогою віртуальної непружної нитки, що зв'язує протилежні грані сусідніх вокселів. Довжина такої нитки дещо більше відстані між вокселями у своєму початковому стані. За рахунок того, що довжина з'єднувача більше початкової відстані між вокселями, досягається плавне загасання величини зсуву пов'язаних вокселів під час передачі взаємодії при віддаленні вокселя-ініціатора руху від пов'язаних вокселів.

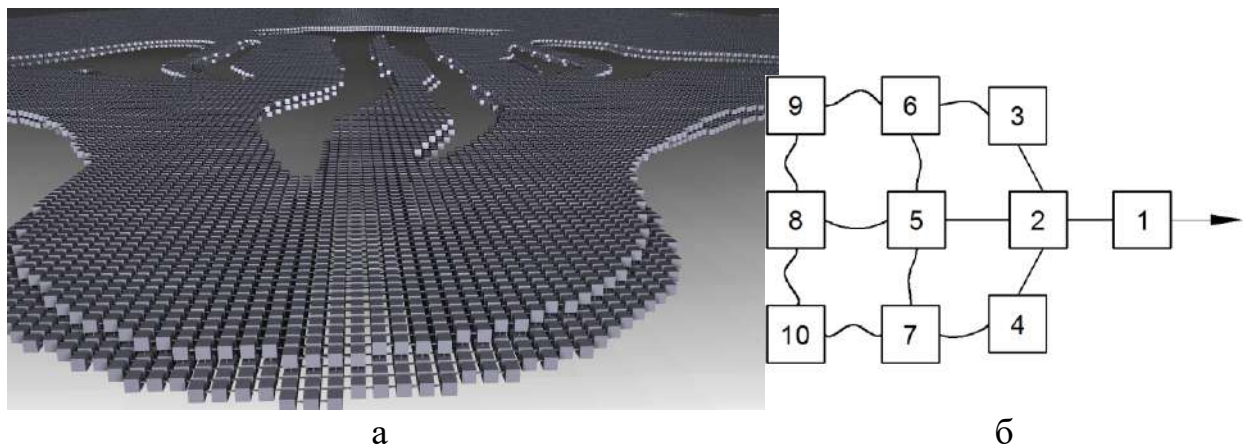


Рисунок 5 – Модель пов'язаних вокселів

Основними параметрами такої системи вокселів є: координати центру вокселя, розміри вокселя, відстані між краями сусідніх вокселів в кожному вимірі, довжини з'єднувачів та значення яскравості вокселя. Варіюючи ці величини, можна змінювати «видовжуваність» тканин, тобто визначати як будуть взаємодіяти між собою елементи системи вокселів. Можливість задавати дані параметри для всіх видів тканин, незалежно один від одного, дозволяє проводити моделювання хірургічно складного втручання із втручанням відразу на кілька видів тканин.

У описуваному методі зміни об'ємних даних можна виділити наступні основні етапи:

- 1) позрізове перетворення сегментованих елементів томографічних зображень, в систему взаємопов'язаних вокселів;
- 2) зміна положення окремих елементів користувачем програми;
- 3) перерахунок положення вокселів системи;
- 4) перетворення модифікованої системи вокселів в набір растрових зображень зрізів (рис. 6а).

Результат зазначених деформацій до системи вокселів одного зрізу показаний на рис. 6 (а - модифікований томографічний зріз, б - тривимірна візуалізація деформованої системи вокселів).

Відзначимо, що описаний метод деформування системи вокселів має біофізичну інтерпретацію, оскільки рух вокселів при цьому аналогічно деформації еластичних і колагенових волокон в шкірі при її подовжньому натягненні.

Також у роботі запропонована така методика деформування системи вокселів, яка забезпечує неможливість їх зіткнення. З цією метою визначено сімейство функцій, які описують рух вокселів та задовольняють вказаним властивостям їх руху, що дозволяє виробляти деформації воксельної моделі із різними формами таких деформацій.

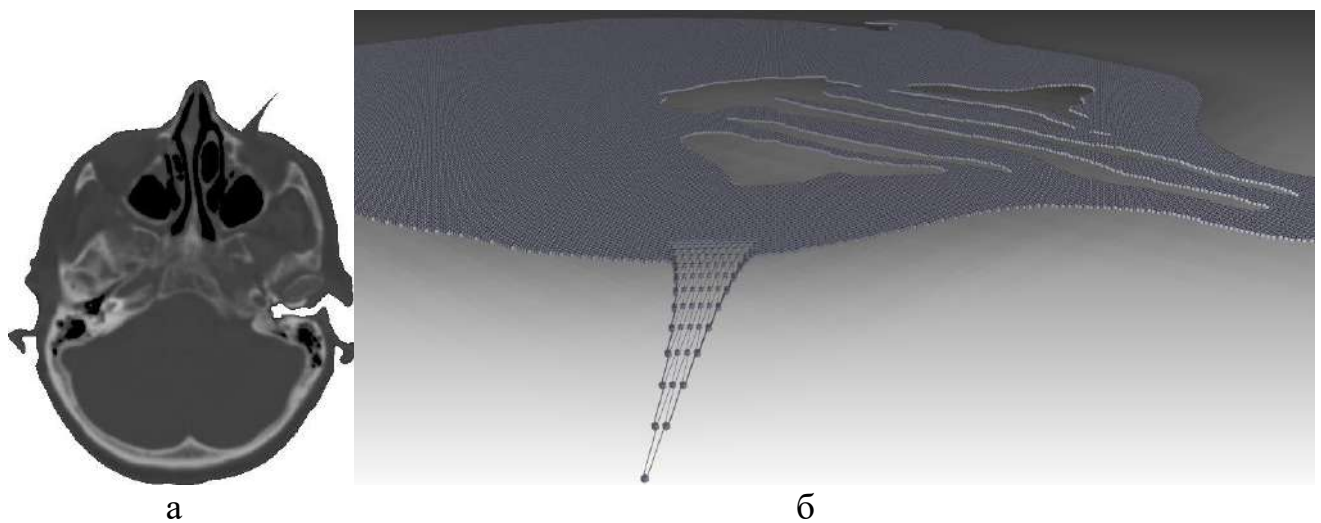


Рисунок 6 – Модель пов'язаних вокселів після модифікації

Зазначене сімейство функцій описується формулою:

$$|\bar{S}_A| = |\bar{S}_O| \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right),$$

де $\bar{S}_O$ - вектор, проведений від початкового положення ведучого вокселя (точка О) до його поточного положення, $\bar{S}_A$ - вектор пересування відомого вокселя, який спочатку знаходився в деякій точці А, r – відстань від точки О до точки А, R – радіус області, що підлягає деформуванню.

Для прикладу наведемо форми поверхонь деформованої системи вокселів при значеннях параметрів, зазначених на рис. 7.1-7.3.

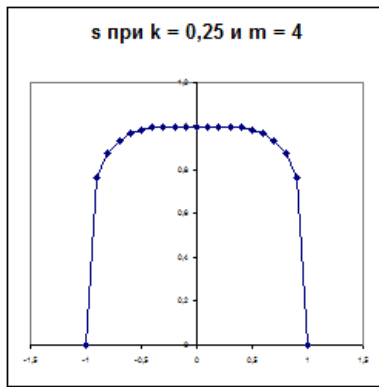


Рисунок. 7.1

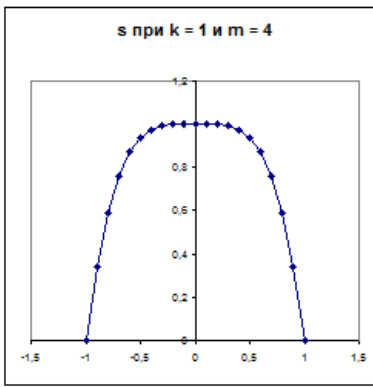


Рисунок. 7.2

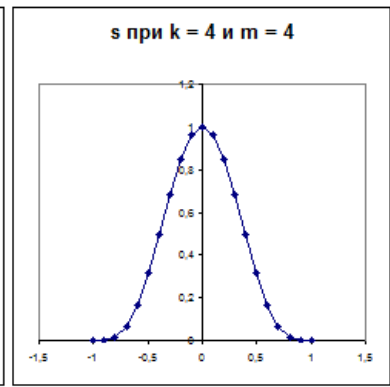


Рисунок. 7.3

У третьому розділі запропоновано ще один метод комп'ютерного попереднього планування пластичних втручань. Цей метод заснований на деформації полігональних моделей, побудованих за томографічними даними або результатами фотограмметрії обличчя пацієнта. Процедура 3D деформації просторової полігональної моделі лицевого відділу голови пацієнта має на меті локальні деформації такої моделі, реалізовані за рахунок зміни набору трикутників, які апроксимують ділянку поверхні моделі обличчя людини. Інакше кажучи, така зміна геометрії моделі обличчя пацієнта пов'язана з модифікацією послідовності вершин і зміною топології трикутників, що побудовані на цих вершинах. Координати вершин полігональної сітки, які потрапили в область деформації, обчислюються у відповідності з наступною формулою.

$$V' = V + \bar{N}_{AVG} \cdot (S(V, w) \cdot F - \text{DIST}_{\text{avg}}),$$

де w - вагова функція $[0..1]$, що визначає те, наскільки сильно екструзивний інструмент впливає на вершину; d - відстань від вершини до центру деформації; R - радіус обмежуючої сфери; V' - координати вершини після деформації; V - початкові координати вершини.

Приклад деформації полігональної сітки і графік функції $S(V, w)$, що параметризує характер деформації, відображені на рис. 8.

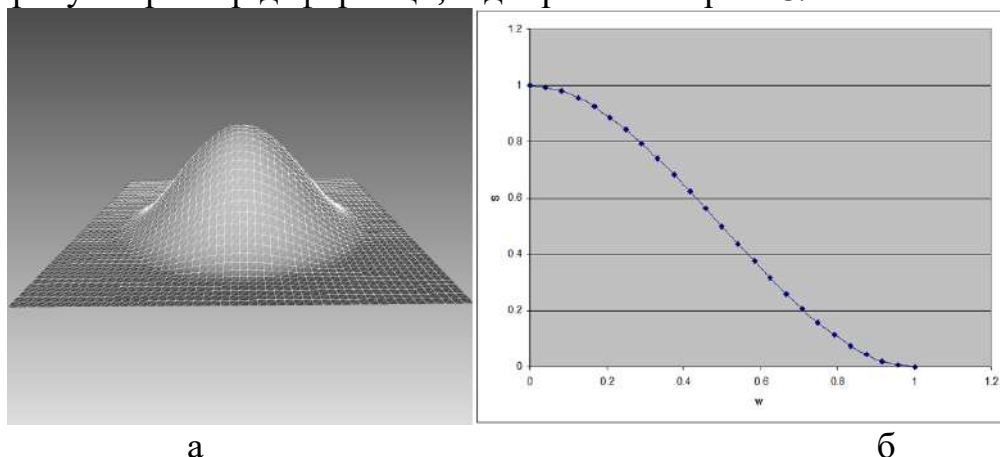


Рисунок 8

а) Деформована полігональна поверхня; б) графік функції $S = 3w^2 - 2w^3$, які задають характер деформації.

Четвертий розділ описує комп'ютерний розрахунок процесів руху повітря у верхніх дихальних шляхах для оцінки наявності або відсутності показань до ринопластики з використанням даних інтроскопічних досліджень.

Основною проблемою під час таких розрахунків є те, що методика розрахунку аеродинамічний опору ділянок повітряносприятливих шляхів залежить від того, чи є рух повітря в цих ділянках турбулентним або ламінарним. Вважається, що організм людини влаштований так, що у нормі рух повітря в повітряносприятливих шляхах є ламінарним. Однак при тих чи інших порушеннях таких шляхів рух повітря на їх окремих ділянках може ставати турбулентним, визначаючи функціональну неспроможність верхніх дихальних шляхів у цілому.

Для подолання зазначеної проблеми розроблено алгоритм, що дозволяє оцінити спроможність повітряносприятливих шляхів пацієнта.

Цей алгоритм ґрунтується на ітераційній процедурі, що включає розрахунок аеродинамічних опорів малих ділянок повітряносприятливих шляхів і повітряносприятливих шляхів в цілому, корекцію в кожній ітерації величин потоку повітря в лівому і правому шляхах і розрахунок різниць тисків між початком і кінцем цих шляхів. Ітераційна процедура не припиняється до тих пір, поки різниці вищевказаних тисків для обох шляхів не стануть відрізнятися на прийнятно малу величину (при абсолютно точному розрахунку ці дві різниці тисків повинні бути рівними).

Оцінка геометричних характеристик верхніх дихальних шляхів здійснюється за рахунок програмного аналізу томографічного дослідження голови пацієнта і побудованих за цими даними віртуальних тривимірних моделей верхніх дихальних шляхів (рис. 9).

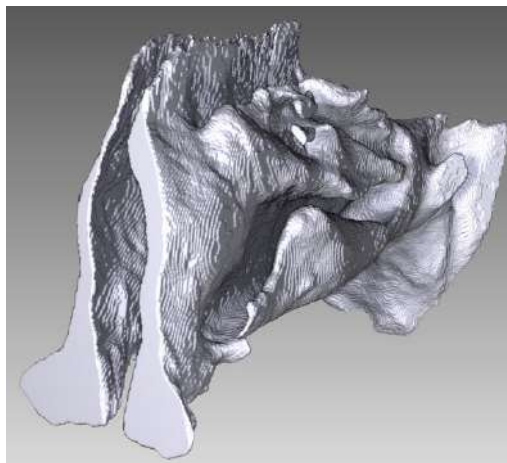


Рисунок 9 - Тривимірна полігональна модель повітряносприятливих шляхів

Виділення і розмітка елементів зрізів повітряносприятливих шляхів відбувається за допомогою порогової заливки пов'язаних областей, що проводиться після ручного встановлення початкових точок заливки. Ця операція можлива завдяки тому, що поглинання рентгенівського випромінювання в елементах об'єму (а, отже, і яскравість відповідного вокселя), заповнених повітрям значно нижче, ніж у м'яких або твердих тканинах голови людини.

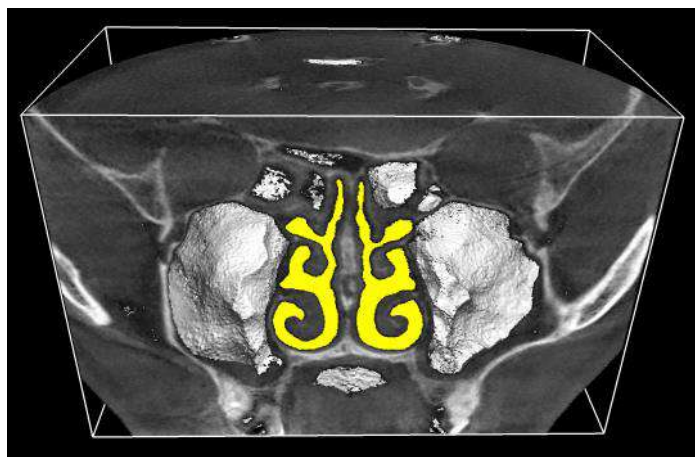


Рисунок 10 - Об'ємна візуалізація повітряночних шляхів за даними комп'ютерної томографії

Після завершення програмної сегментації повітряночних шляхів (рис. 11) проводиться автоматизований підрахунок кількості сегментованих вокселів у зрізах фронтальній проекції.

N=119	N=168	N=217	N=266	N=315
N=364	N=413	N=462	N=511	N=562

Рисунок 11- Сегментовані повітряночні шляхи на томографічних зрізах голови у фронтальній проекції

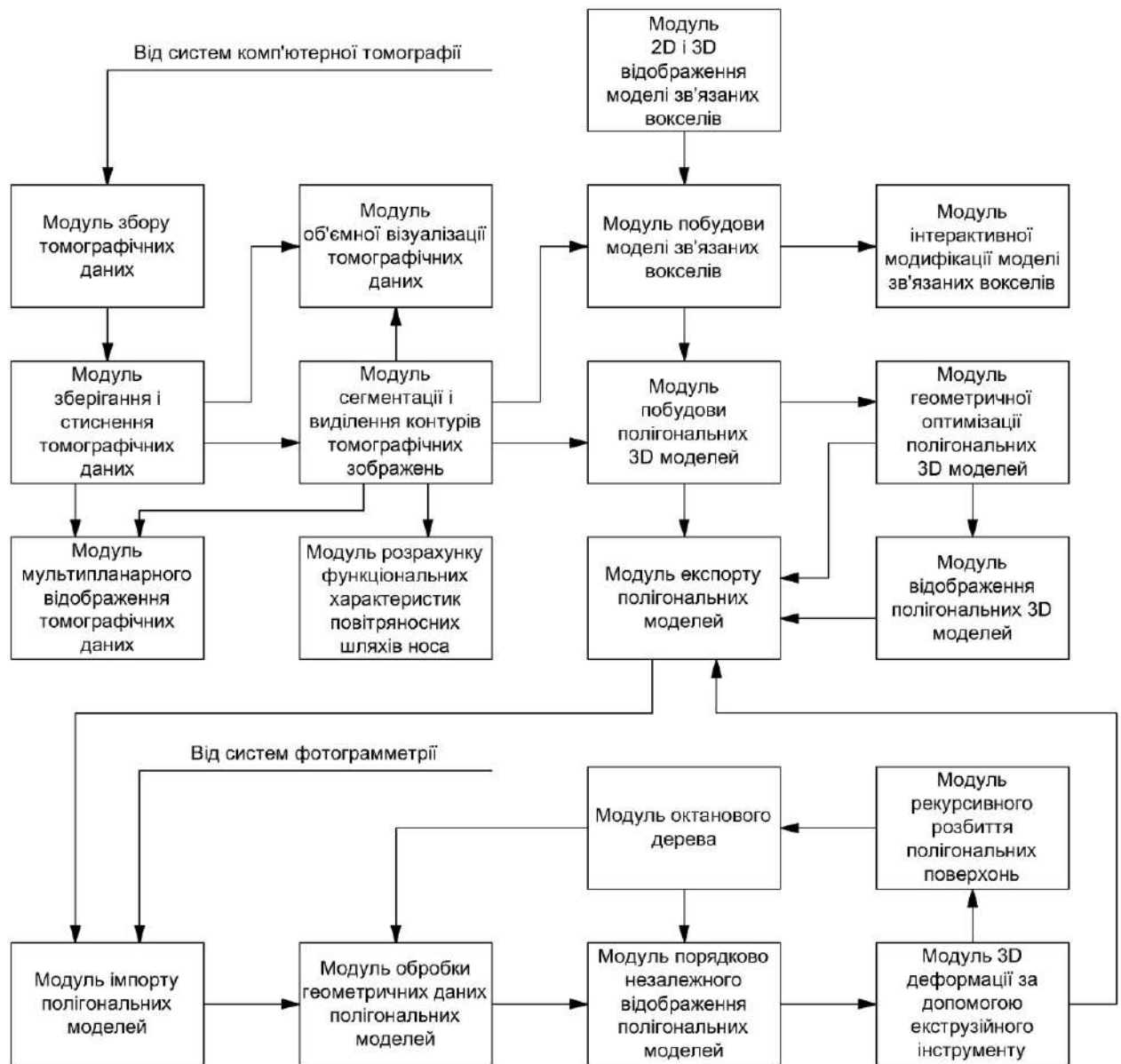


Рисунок 12 – Структурна схема системи комп'ютерного планування пластичних втручань на обличчі людини

Згідно з описаними вище етапами розроблених методів планування була синтезована структурна схема системи, що реалізує комп'ютерне планування пластичних втручань на обличчі людини (рис. 12). При створенні структурної схеми також враховувалися основні розроблені медико-технічні вимоги та практичні рекомендації з проектування системи комп'ютерного планування пластичних втручань на обличчі людини, які викладені в четвертому розділі.

У **висновках** зазначено основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

Аналіз сучасних методів і програмних засобів планування пластичних хірургічних втручань на обличчі людини показав, що в них майже не

використовуються доказові підходи, які б дозволяли комплексно враховувати функціональні показники носового дихання та морфологічно-естетичні характеристики обличчя з урахуванням індивідуально-анатомічної мінливості. Тому, дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-практичної задачі – розробці нових методів і засобів комп'ютерного планування пластичних втручань на обличчі людини.

Основні результати полягають у тому, що:

1. Встановлено, що метод комп'ютерного планування пластичних втручань має базуватися на використанні детальної моделі обличчя і верхніх дихальних шляхів людини, яка складається щонайменше з 20 мільйонів трикутників, що апроксимують поверхню анатомічних структур з відповідним до критерію Найквисту розрізненням. Відображення такої тривимірної віртуальної моделі має відбуватися зі швидкістю не менш ніж 20 кадрів у секунду та потребує **відповідних обчислювальних ресурсів** щодо графічної станції.

2. Встановлено, що при моделюванні хірургічного втручання на тканинах обличчя людини на основі розробленого методу переміщення зв'язаних елементів об'єму, для збереження просторової конфігурації анатомічних структур щільність вокселів віртуальної моделі має складати не менш ніж 5000 елементів на кубічний сантиметр, а для комп'ютерного моделювання функціонального ринохірургічного втручання – не менше ніж 7000 вокселів на кубічний сантиметр тканини, що пов'язано з точністю побудови геометричної моделі для подальшого визначення аеродинамічних характеристик повітряного потоку.

3. Встановлено, що при використанні моделі переміщення взаємопов'язаних вокселів рух елементів об'єму має описуватися математичними функціями (якими), параметри яких дозволяють враховувати різні типи тканин та види деформації (пружні, здвигу) з урахуванням індивідуальної варіабельності.

4. Моделювання результатів пластичних втручань за рахунок деформації віртуальних полігональних моделей обличчя людини, побудованих за результатами фотограмметричного або томографічного дослідження показало, що кількість трикутників, необхідних для моделювання ділянки обличчя людини площею 1 сантиметр, має бути не менше 90 для точної апроксимації індивідуальної геометрії обличчя пацієнта.

5. В результаті використання запропонованої ітераційної процедури визначення функціональної достатності верхніх дихальних шляхів, яка ґрунтується на математичній моделі руху повітря в повітряноснах шляхах носа, та використовує результати обробки та візуалізації томографічних зрізів цих шляхів, встановлено, що зазвичай для оцінки достатності функції верхніх дихальних шляхів достатньо від 7 до 10 ітерацій цієї процедури.

6. Розроблені основні медико-технічні вимоги та практичні рекомендації до системи комп'ютерного планування пластичних хірургічних втручань на обличчі людини.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Статті у провідних фахових виданнях України

1. Книгавко Ю.В. Алгоритмы программного рендеринга трехмерной графики для задач медицинской визуализации / Ю.В. Книгавко, О.Г. Аврунин // Технічна електродинаміка, тем випуск «Силовa електроніка та енергоефективність».– 2010.– Ч.3.– С. 258-261.
2. Книгавко Ю.В. Метод компьютерного планирования пластических вмешательств на лице человека за счет изменения объемных томографических данных / Ю.В. Книгавко // Радиотехника.- 2012. – №168. – С. 87-92.
3. Книгавко Ю.В. Программная визуализация объемных медицинских данных / Ю.В. Книгавко, О.Г. Аврунин // Технічна електродинаміка.– Тем. випуск «Силовa електроніка та енергоефективність».– 2011.–С. 301-308.
4. Книгавко Ю.В. Математическая модель динамической пространственной модификации томографических данных / Ю.В. Книгавко // Радиотехника.- 2012. – №170. –С. 92-97.
5. Книгавко Ю. В. Биофизическая интерпретация методики измерения объемных данных при компьютерном планировании пластических вмешательств на лице пациента и проблемы использования этой методики /Ю.В. Книгавко, О.Г. Аврунин// Технічна електродинаміка, тем випуск «Силовa електроніка та енергоефективність».– 2012.– Ч.3.– С. 194-197.
6. Книгавко Ю.В. Компьютерное планирование пластических вмешательств методом деформации полигональной модели лица человека / Ю.В. Книгавко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.-2013.-№61.-С.11-16.
7. Книгавко Ю.В. Расчет функциональных параметров, определяющих показания к проведению ринопластики / Ю.В. Книгавко, О.Г. Аврунин, Х.И. Фарук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.-2013.-№62.- С.24-27.

Статті у іноземних фахових виданнях

8. Knigavko I.V. Calculation of venturi nozzles diameter for nasal breathing evaluation device / I.V. Knigavko, O.G. Avrunin, H.I. Farouk // International Journal of Mechanical Engineering.-2013.-Vol. 2.-P.21-28.

Матеріали конференцій

9. Кнігавко Ю.В. Програма візуалізація об'ємних медичних даних / Ю.В. Кнігавко // Матеріали ХІХ міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я».- Харків.-2011.- НТУ «ХПІ».- Ч.3.-С. 103.
10. Книгавко Ю.В. Методы визуализации томографических данных при планировании хирургических вмешательств на лице человека / Ю.В. Книгавко, О.Г. Аврунин // Сб. Науч. трудов. 4-го Междунар. радиоэлектронного форума МРФ-2011.- Т. 3.-Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2011.- С.35-38.
11. Кнігавко Ю.В Використання методів тривимірної деформації при комп'ютерному плануванні пластичних втручань на обличчі людини / Ю.В Кнігавко, О.Г. Аврунін // Матеріали ХХ міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я».-Харків.-2012.- НТУ «ХПІ».- Ч.3.-С. 89.
12. Книгавко Ю.В. Метод трехмерного отображения томографических срезов для компьютерного планирования пластических вмешательств на лице человека / Ю.В. Книгавко // Сб. Науч. трудов. 5-го Междунар. радиоэлектронного форума МРФ-2014.- Т.3.-Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2014.- С.28-29.
13. Книгавко Ю.В. Компьютерное планирование пластических вмешательств на лице человека за счет изменения объемных томографических данных / Ю.В. Книгавко // Материалы 16-го международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в ХХІ веке».-Т.-Харьков.-2012.-С.200-201.
14. Книгавко Ю.В. Оптимизация полигональных моделей лица человека, построенных по томографическим данным / Ю.В. Книгавко, О.Г. Аврунин // Тезисы 11-й международной научно-технической конференции «Проблемы информатики и моделирования» .-Харьков.-2011.-С. 34-35.
15. Книгавко Ю.В. Применение метода трехмерной лепки полигональных моделей для задач компьютерного планирования пластических вмешательств на лице человека / Ю.В. Книгавко, Х.И. Фарук, Е.В. Солодка // Материалы 17-го международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в ХХІ веке».-Т.-Харьков.-2013.-С.158-159.

Патенти

16. Пат. № 97779, Україна, МПК А61В 5/08. Спосіб планування ринологічних функціонально-естетичних оперативних втручань / Аврунін О. Г., Кнігавко Ю. В., Журавльов А. С., Калашник Ю. М., Саєд Х. И., Пащенко А.А; заявник та патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № а201108547; опубл. 12.03.2012., Бюл. 2012.– № 5.