

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПОДБОР ГЛЕНОИДНОГО АДАПТЕРА ДЛЯ РЕЗЕКЦИИ ПОВРЕЖДЕННОЙ ЧАСТИ СУСТАВНОЙ ВПАДИНЫ ЛОПАТКИ

к.т.н. **Громыко О.В.**, маг. **Мирейко Е.В.**

Белорусский государственный университет, Минск

Самостоятельное развитие систем автоматизированного проектирования (САПР) влечет за собой тенденции развития и тех областей, в которых они активно используются, как, к примеру, хирургии. Создание чертежей в программах САПР, на основе которых базируется технология производства эндопротезов с помощью компьютерного моделирования и фрезерования на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), уже стало реальностью и служит неотъемлемой частью успешного хирургического лечения. Следующим этапом, на который переходит развитие САПР, является использование результатов построения и расчетов при работе с 3-D принтерами, которые обеспечивают быстрое производство сложных, прочных и недорогих эндопротезов. Также этот процесс позволяет более просто реализовать концепцию индивидуального подхода к каждому пациенту в процессе хирургического лечения.

На данный момент тотальное эндопротезирование плечевого сустава является довольно сложной и длительной операцией, включающей в себя полную замену головки плечевой кости и суставной впадины лопатки. При проведении данной операции большая часть времени уделяется процессу работы с суставной впадиной, который можно разбить на следующие подзадачи:

- 1) правильное расположение гленоидного адаптера;
- 2) снятие слепка с суставной впадины для изготовления индивидуального адаптера.

Как правило, позиционирование гленоидного адаптера осуществляется хирургом во время операции. До операции на основе полученных результатов исследования с помощью рентгеновских лучей и КТ сканирования хирург определяет примерный размер суставной впадины и заказывает в операционную набор гленоидных адаптеров различных размеров. На правильный подбор гленоидного адаптера во время операции обычно уходит до пяти минут (не учитывая времени, потраченного на поиск подходящего адаптера, если ни один из заранее подготовленных не подходит по тем или иным причинам). Как известно, каждая минута, проведенная под общим наркозом, губительно влияет на здоровье пациента. Также нельзя исключать некоторый процент ошибок, которые могут привести к развитию инфекционных процессов, а в следствии к еще большим травмам и даже инвалидности. Как показывает статистика, каждый год происходит более четырех тысяч хирургических ошибок в ортопедии. Последствия этих хирургических ошибок варьировались от временных травм в 59% случаев к смерти в 6,6% случаев и увечьям в 33% случаев. Для сведения к минимуму появления подобных ошибок была поставлена задача разработки проекта, который автоматизирует этот проблематичный процесс и упростит работу хирургов-ортопедов.

Рассмотрим в общих чертах, как на данный момент в хирургии происходит позиционирование гленоидного адаптера. Для начала гленоид освобождается от остатков здоровой и поврежденной гленоидной губы. Затем хирург определяет оптимальное положение гленоидного адаптера. Этот процесс осуществляется на глаз и его правильность зависит только от опытности и знаний хирурга. Нужно использовать гленоидный адаптер такого размера, чтобы он наилучшим образом покрывал поверхность суставной впадины. На рисунке 1 показан правильный подбор и позиционирование гленоидного адаптера во время операции.



Рисунок 1. – Правильное расположение гленоидного адаптера в суставной впадине, осуществляемое хирургом во время операции.

После подбора подходящего гленоидного адаптера в отверстие, находящееся в центре адаптера, вставляется тонкое сверло. При этом гленоидный адаптер плотно удерживается ассистентом хирурга в максимально неподвижном состоянии: каждый миллиметр сдвига может повлиять на здоровье пациента. Хирург производит сверление гленоида сначала тонким сверлом (для задания оси сверления), а затем уже другим сверлом, специально подобранным в соответствии с характером повреждения. Далее происходит установка гленоидного основания. На данный момент подобная инструкция является общей в случае необходимости замены гленоидного компонента. Но этот способ не является совершенным т.к. во время сверления гленоида направляющий адаптер может быть случайно сдвинут ассистентом из-за того, что между адаптером и гленоидом нет полного соприкосновения, каким бы точно подобранным по размеру и форме он ни был. Именно изготовление индивидуального гленоидного адаптера с помощью созданного проекта может с легкостью решить эту проблему.

Для начала необходимо было создать 3-D модель лопатки пациента. Для этого полученные в ходе компьютерной томографии снимки обрабатывались и конвертировались в форматы, используемые в пакетах САПР. Подготовленную модель открыли в программе Unigraphics NX, которая обладает всеми необходимыми средствами проектирования и имеет возможность запрограммировать любой процесс на нескольких языках программирования (C++, Java, VB.net). Для этого в комплект поставки продукта Unigraphics NX была включена библиотека классов и методов, разработанных специально для этого продукта и имеющая свою структуру в соответствии со спецификацией выбранного языка программирования. Для достижения поставленной задачи был выбран язык программирования VB.net.

При получении компьютерной модели лопатки начало системы координат находилось в плоскости суставной впадины в произвольной точке. Проект был написан с активным использованием функций аналитической геометрии для автоматизированного определения положения любого геометрического объекта на поверхности лопатки.

Далее в коде была определена декартова система координат следующим образом: $\{ Dim \ orientation \ As \ Matrix3x3; \ orientation1.Xx = 1.0; \ orientation1.Xy = 0.0; \ orientation1.Xz = 0.0; \ orientation1.Yx = 0.0; \ orientation1.Yy = 1.0; \ orientation1.Yz = 0.0; \ orientation1.Zx = 0.0; \ orientation1.Zy = 0.0; \ orientation1.Zz = 1.0; \}$. Затем надо было просканировать всю лопатку для того, чтобы программа понимала, где в пространстве есть точка, а где нет. Поверхности, кривые, листы и твердые тела уже были заданы зависимостями от расположения точек, участвующих в их определении. Поэтому была

поставлена задача создания текстового файла, содержащего все точки на поверхности. Для этого была написана функция на основе значений Boolean, которая считывала только два возможных значения (True или False): { *Public Class PointAdder; Private pointList As New List (Of Point); Private PointTrue As Boolean (Of Point); If Point=Point.PointTrue Then pointList.Add (New Point(e.X, e.Y, e.Z)=Dim Point_i) End If;* }. Если на входе в функцию точка имела значение True, то она являлась точкой на поверхности лопатки, если False, тогда нет. Все точки со значениями True записывались в виде таблицы 1 с присвоенными им уникальными именами.

Таблица 1. Координаты точек, находящихся на поверхности лопатки

Имя точки	X	Y	Z
Point_1	0.1060	0.102	0.0
Point_2	0.107	0.102	0.0
Point_3	0.108	0.11	0.1
Point_4	0.1145	0.202	0.1
Point_5	0.1158	0.250	0.105
Point_6	0.1273	0.257	0.12

Полученная после сканирования модель лопатки являлась неоднородным и не целым объектом. Поверхности лопатки состояли из точек, различных кривых и поверхностей. Все эти элементы необходимо было описать в программе для того, чтобы иметь математическую модель лопатки и производить расчеты для корректного позиционирования гленоидного адаптера. Для создания программного описания кривых и поверхностей воспользовались их математическими уравнениями. В нашей модели помимо простейших кривых присутствовали следующие кривые: кубические эрмитовы сплайны, кривые Безье, В-сплайны. А помимо простейших поверхностей присутствовали параметрические кубические поверхности и поверхности Безье. Далее приводятся основные уравнения кривых и поверхностей, использовавшиеся при создании математической модели.

Для описания кубического эрмитова сплайна воспользовались уравнением:

$$P(t) = \sum a_i t^i \quad (1)$$

Кривая Безье описывается уравнением:

$$P(t) = \sum V_i B_{i,n}(t), \quad 0 \leq t \leq 1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Уравнение В-сплайна имеет вид:

$$P(t) = \sum N_{i,k}(t) V_i \quad (3)$$

Уравнение параметрической кубической поверхности можно записать в виде:

$$P(s, t) = [s][M]_H [G]_H [M_H]^T [t]^T \quad (4)$$

Общее уравнение поверхности Безье задается как:

$$Q(s, t) = \sum \sum V_{i,j} B_{i,n}(s) B_{j,m}(t) \quad (5)$$

После того как были созданы математические модели основных кривых и поверхностей, необходимо было по принципу смешивания участков поверхностей Безье сшить все поверхности лопатки для того, чтобы не было зазоров, насколько малыми они бы не были. Далее приведена часть кода по проведению этого процесса:

```
Dim sewBuilder1 As Features.SewBuilder
sewBuilder1 = workPart.Features.CreateSewBuilder(nullFeatures_Feature)
sewBuilder1.Tolerance = 0.0154
sewBuilder1.Abstract = Add New Instances
sewBuilder1.SewAllInstances = True
```

```

theSession.SetUndoMarkName(markId1, "Sew Dialog")
Dim body1 As Body = CType(workPart.Bodies.FindObject("EXTRACT_FACE(All)"), Body)
Dim added1 As Boolean
added1 = sewBuilder1.TargetBodies.Add(body1)
Dim body2 As Body = CType(workPart.Bodies.FindObject("EXTRACT_FACE(All)"), Body)
Dim added2 As Boolean
added2 = sewBuilder1.ToolBodies.Add(body2)
Dim markId2 As Session.UndoMarkId
markId2 = theSession.SetUndoMark(Session.MarkVisibility.Invisible, "Sew")
Dim nXObject1 As NXObject
nXObject1 = sewBuilder1.Commit()
theSession.DeleteUndoMark(markId2, Nothing)
theSession.SetUndoMarkName(markId1, "Sew")
sewBuilder1.Destroy()

```

После того как все поверхности были сшиты, приступили к программированию автоматизированного способа определения границ суставной впадины и нахождения всех ключевых точек и осей. С помощью них осуществлялось корректное позиционирование гленоидного адаптера. В результате работы программы необходимо было получить текстовый файл с расположением и координатами ключевых точек, представленном в виде таблицы 2:

Таблица 2. Координаты и расположение ключевых точек

Ключевая точка	Расположение	X	Y	Z
inferior_pt	гленоид	115.42206	-115.6925	-742.776
superior_pt	гленоид	104.65915	-128.8585	-716.687
posterior_pt	гленоид	113.6497	-109.506	-730.658
anterior_pt	гленоид	107.823	-127.7298	-742.428
inferior_angle_pt	гленоид	51.721895	-50.31783	-825.877
medial_border_pt	гленоид	18.250932	-83.80246	-718.766

Также по найденным ключевым точкам были построены ключевые оси и локальная система координат, центр которой находится в точке Glenoid Center, которая является центром суставной впадины. Основные ключевые оси и некоторые ключевые точки представлены на рисунке 2.

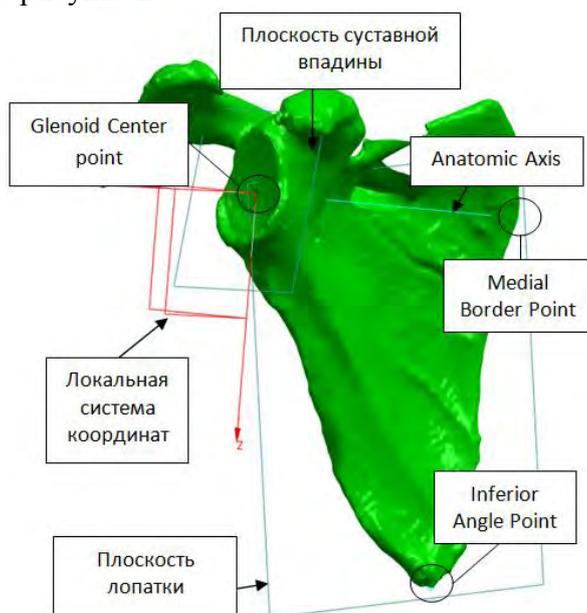


Рисунок 2. – Расположение основных ключевых точек и осей, где Glenoid Center Point - центр суставной впадины, Medial Border Point – самая выпуклая точка медиального края лопатки, Anterior Angle Point – самая крайняя точка нижнего угла лопатки, Anatomic axis - ось, вдоль которой происходит сверление лопатки для установки эндопротеза.

После построения всех необходимых точек и осей приступили к процессу позиционирования гленоидного адаптера и снятия слепка с поврежденной поверхности гленоида. Вместе с загружаемой компьютерной моделью лопатки пациента программа ищет в базе данных все имеющиеся в наличии гленоидные адаптеры для того, чтобы размеры суставной впадины и адаптер максимально совпадали. После нахождения подходящего адаптера необходимо было произвести его позиционирование. Именно этот этап является ключевым при проведении имплантации суставной впадины. Правильное расположение гленоидного адаптера позволяет произвести точное сверление лопатки без образования трещин и разрушения. Позиционирование в общем случае происходит следующим образом: гленоидный адаптер должен соединяться с гленоидной поверхностью таким образом, чтобы анатомическая ось в лопатке под названием *Anatomic Axis* совпадала с центральной осью *Center Axis*, проходящей вдоль основной направляющей адаптера. Далее гленоидный адаптер движется вдоль оси *Anatomic Axis* пока не произойдет полное соприкосновение двух локальных центральных точек: центральной точки на поверхности суставной впадины (*Glenoid Center Point*) и центральной точки на поверхности адаптера (*Point Local Center*). Т.е. точке *Point Local Center* присваивается значение координат точки *Glenoid Center Point*. Результат правильного позиционирования адаптера с помощью созданного проекта можно увидеть на рисунке 3.

После выполнения позиционирования программа производит снятие слепка с поврежденной поверхности для создания индивидуального адаптера, который можно увидеть на рисунке 4.

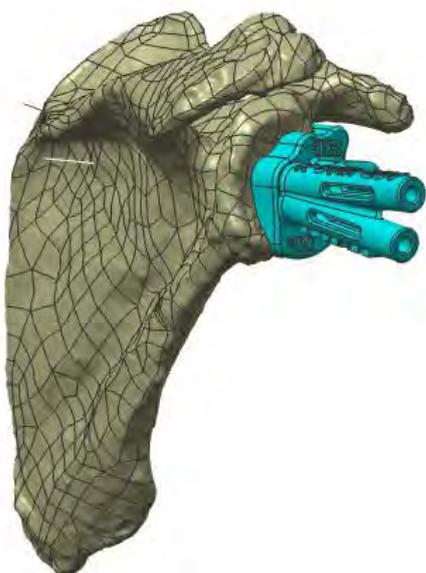


Рисунок 3. – Правильное расположение гленоидного адаптера в суставной впадине в САПР системе Unigraphics NX.

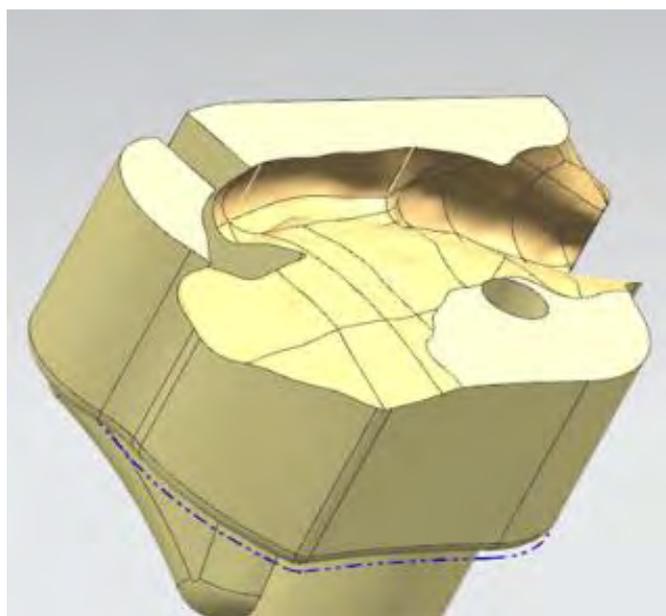


Рисунок 4. – Модель индивидуального адаптера на основе слепка суставной впадины.

Полученный слепок распечатывают на 3D принтере и при больших повреждениях используют как шаблон для восстановления анатомической формы суставной впадины. Если же повреждения незначительны, то этот же распечатанный адаптер используют для того, чтобы максимально точно произвести сверление лопатки вдоль оси *Anatomic Axis*. Правильное расположение гленоидного адаптера позволяет произвести точное сверление лопатки без образования трещин и разрушения, а также позволяет избежать случайного смещения во время операции.

РЕЗЮМЕ

В данной работе представлен проект, являющийся автоматизацией процесса подбора гленоидного адаптера для резекции поврежденной части суставной впадины лопатки.

Проект включает в себя создание 3-D модели лопатки в САПР системах на основе снимков, полученных в ходе компьютерной томографии. 3-D модель гленоидного адаптера, который был автоматически подобран с учетом характера повреждения из базы данных стандартных гленоидных адаптеров, используется для снятия слепка с поврежденной поверхности суставной впадины. Компьютерная модель слепка применяется для печати на 3-D принтере индивидуального гленоидного адаптера, используемого хирургами-ортопедами во время операции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бегун, П. И. Биомеханические системы человека: Учеб. пособие / П. И. Бегун, О. П. Кормилицын, Ю. А. Шукейло, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. –188 с.
2. Каплан, А. В. Повреждения костей и суставов. 3-е издание / А. В. Каплан. -М.: Медицина, 1979. – 568 с.
3. Zimmer, Эндопротез плечевого сустава Anatomical Shoulder реверсивный. Хирургическая техника.
URL:http://www.zimmer.com/content/pdf/ruRU/TARG_06.01276.029_2009-11c_ST_Anatomical_Shoulder_Inverse.pdf - Дата доступа 14.06.2014.
4. Графский О.А. Моделирование сплайнов: Учебное пособие/Графский О.А. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2010. – 75 с.
5. Компьютерная геометрия: учеб. пособие для студ. вузов /Н.Н. Голованов, Д.П. Ильютко, Г.В. Носовский, А.Т. Фоменко. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 512 с.
6. Буланже, Г. В., Инженерная графика. Проецирование геометрических тел / Г. В. Буланже, И. А. Гущин, В. А. Гончарова. М.: Высшая школа, 2003. -184 стр.
7. Бегун П.И., Афонин П.Н. Моделирование в биомеханике. М.: Высшая школа, 2004. – 390 с.
8. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. СПб.: Питер, 2004. – 560.
9. Григорьева, О. А. Современные САПР: Учеб. пособие / О.А. Григорьева. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – 73 с.

SUMMARY

The paper presents an automated glenoid adapter selection for resection of the damaged part of glenoid cavity. It includes creating 3-D CAD model of glenoid based on patient's computer-aided tomographic images. The 3-D model of glenoid adapter cast that was chosen from the adapter database and automatically fitted the nature of the injury is used for printing an individual adapter on 3-D printer which will be used by orthopedic surgeons during the surgery.

E-mail: gromykoov@mail.ru
ellen-mirre@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.11.2014