

Краевая научно-практическая конференция  
учебно-исследовательских работ учащихся 6-11 классов  
«Прикладные и фундаментальные вопросы математики»

Математическое моделирование

**Математическая модель движения рук спортсмена при выполнении  
прыжка в фигурном катании**

Выполнила:

Лядова Елизавета Александровна,  
11 класс, МБОУ "Лицей №1",  
г. Пермь,

Руководители:

к. ф.-м. н., доцент ПНИПУ  
Шабрыкина Наталья Сергеевна,  
старший преподаватель ПНИПУ  
Анфёров Сергей Дмитриевич

Пермь. 2016.

## Оглавление

Введение.....	3
Техника исполнения прыжка .....	4
Модель тела фигуриста .....	6
Обзор технологий захвата движения (Motion Capture).....	8
Методика подготовки и проведения эксперимента.....	9
Изготовление маркеров .....	9
Видеосъемка .....	12
Обработка эксперимента.....	14
Программа 1. Определение координат маркеров .....	14
Программа 2. Построение графиков.....	15
Программа 3. Нахождение углов.....	18
Заключение .....	19
Список литературы .....	20
Приложение 1. Программа поиска координат маркеров.....	21
Приложение 2. Программа построения графиков и создания анимации для визуализации процесса .....	22
Приложение 3. Программа поиска углов между сегментами и углов поворота линии плеч относительно первоначального положения .....	24
Приложение 4. Таблицы с координатами маркеров.....	25

## Введение

Первые коньки, выполненные из костей крупных животных, использовались еще в бронзовом веке. Однако рождение фигурного катания связывают с началом изготовления железных коньков, первые образцы которых появились в Голландии в XII-XIV в. [1]. Изначально фигурное катание представляло собой состязание в искусстве вычерчивания разнообразных фигур на льду.

А сегодня это один из самых красивых и популярных во всем мире зимних видов спорта, отличающийся огромным количеством различных элементов, таких как шаги, спирали, прыжки, вращения, поддержки (только в парном катании и в танцах) и т.д. Возможно, самыми эффектными элементами являются прыжки, от сложности и чистоты исполнения которых во многом зависит итоговая оценка.

Хоть прыжки и отличаются числом оборотов и способом отталкивания, движения рук спортсмена во время исполнения любого из них очень похожи. Правильное и зрелищное исполнение прыжка зависит от слаженной работы ног, корпуса и рук спортсмена. При этом на конечный результат влияет большое количество параметров, поэтому часто даже опытные тренеры не могут определить причину возникновения ошибок при исполнении прыжков.

Данная работа посвящена математическому моделированию движения спортсмена при исполнении прыжка в фигурном катании. При этом основное внимание в данной работе будет сфокусировано на движении рук спортсмена. Целью работы является выявление зависимости параметров прыжка от движения рук во время подготовки к прыжку, отталкивания и полета. Результаты данной работы в дальнейшем будут использованы для построения комплексной модели прыжка в фигурном катании, которая сможет помочь спортсменами при освоении новых прыжков, а также для наработки стабильности выполнения уже изученных многооборотных прыжков.

## Техника исполнения прыжка

Прыжки в фигурном катании разделяются на реберные, когда отталкивание выполняют одной ногой, поставленной на ребро конька, и зубцовые (носковые), когда отталкивание производится двумя ногами, причем опорная нога скользит на ребре, а толчковая ставится на зубцы. Несмотря на различные способы отталкивания, любой прыжок можно разделить на 4 этапа, каждый из которых, в свою очередь, состоит из нескольких фаз [2]:

1. **этап разбега** состоит из фазы приобретения скорости и фазы подготовки к толчку;
2. **этап толчка** включает в себя фазу амортизации и фазу активного отталкивания;
3. **этап полета**, в него входит фаза группировки, фаза полета в группировке и фаза разгруппировки;
4. **этап приземления** состоит из фазы амортизации и фазы выезда.

В фазе приобретения скорости (разбега) используются разнообразные комбинации шагов и перебежки, которые позволят набрать высокую скорость, обеспечивающую хорошие предпосылки для сообщения телу поступательного и вращательного движений.

Толчок придает спортсмену скорость в направлении вперед-вверх и сообщает телу вращение вокруг продольной оси. Движение вперед-вверх и вращение возникают за счет разгибания толчковой ноги и махов руками, второй ногой и туловищем. Есть несколько способов задания вращательного движения в момент толчка, например, скольжение по дуге, вращение верхней части тела или стопорящее движение, которые могут быть использованы в различных комбинациях. К примеру, при исполнении флипа вращение верхней части тела является основным способом задания вращения, а стопорящее движение – вспомогательным.

Во время полета изменять скорость вращения можно за счет времени начала группировки, ее скорости и плотности, длительности фиксации и

скорости разгруппировки, что, в свою очередь, будет влиять на количество оборотов и зрелищность прыжка.

Чтобы при приземлении сохранить равновесие, спортсмену нужно согнуть опорную ногу, тем самым затормозив вертикальное движение тела, уменьшить остаточную скорость вращения вокруг продольной оси и обеспечить жесткость взаимоположения частей тела во время выезда.

Перед тем, как выполнять прыжки на льду, все фигуристы сначала отрабатывают их в зале. Базовым прыжком, необходимым для освоения всех остальных прыжковых элементов, является тур. В данном прыжке отталкивание производится двумя ногами одновременно вертикально вверх. При этом в воздухе спортсмен совершает вращательное движение, которое достигается за счет скручивания корпуса и маха руками при отталкивании и за счет группировки (т.е. приближения изначально разведенных в сторону рук к телу) в фазе полета. Приземление происходит на две ноги или на одну ногу в положение выезда.

Далее будет построена математическая модель исполнения прыжка тур.

## Модель тела фигуриста

В работе будет использована модель человека, состоящая из следующих частей: шара (голова), цилиндра (корпус), усеченного конуса (ноги) и четырех стержней (плечо и предплечье правой и левой руки) (рис. 1).

Считается, что стержни и голова являются недеформируемыми. Стержни прикреплены к корпусу и друг к другу с помощью идеальных шаровых шарниров. Голова по отношению к корпусу неподвижна.

Будем считать, что спортсмен прыгает вертикально вверх и вращается вокруг вертикальной оси, являющейся осью симметрии корпуса. Также будем считать, что руки человека двигаются в плоскости, перпендикулярной оси вращения.

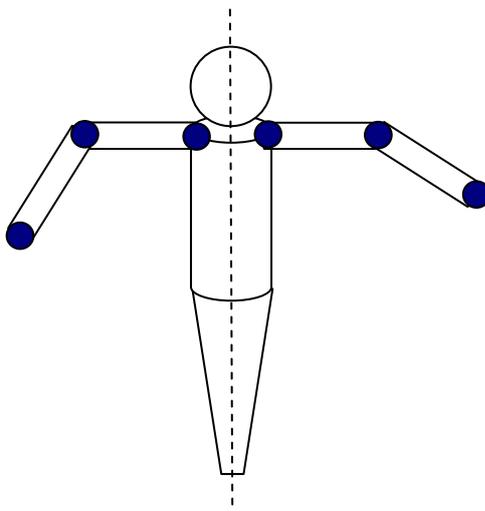


Рис. 1. Модель человека.

При моделировании прыжок тур будет разделен на три фазы: отталкивание, полет и приземление. Для описания движения рук и корпуса в этих фазах необходимо знать положение рук и корпуса в любой момент времени. Для этого необходимо знать координаты концов сегментов рук и углы между данными сегментами и корпусом, а также угол поворота корпуса (рис. 2).

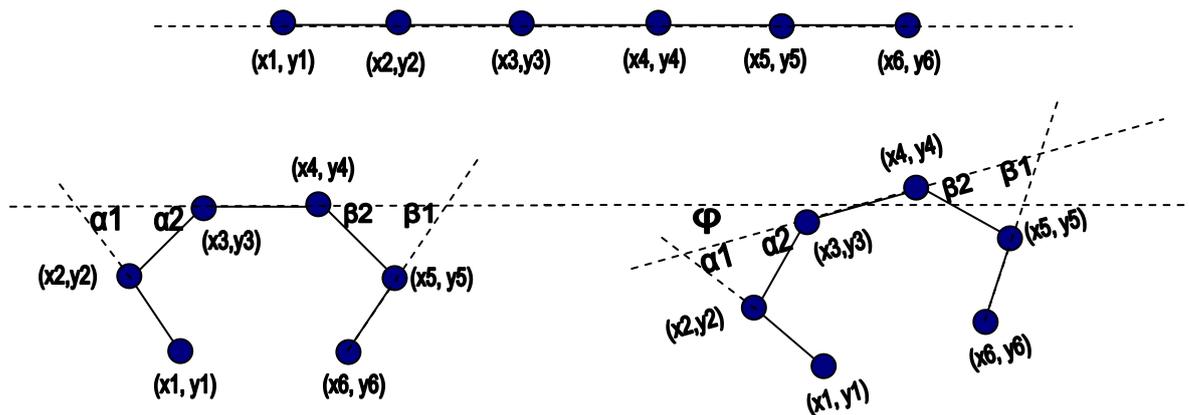


Рис. 2. Расположение рук человека в прыжке (вид сверху).

Поскольку математическое моделирование фигурного катания является малоизученной темой, соответствующих экспериментальных данных в литературе не существует. Поэтому для определения всех необходимых величин были проведены собственные эксперименты. Для получения необходимых данных была разработана система двумерного захвата движения, включающая в себя набор маркеров с системой крепления и программный комплекс для обработки данных видеосъемки.

## **Обзор технологий захвата движения (Motion Capture)**

Захват движения (Motion Capture) или видеоанализ – это технология записи и обработки видео движений человека или объекта, как правило, с использованием специальных маркеров. Захват движения применяется при исследованиях в биомеханике и медицине, а также для создания фильмов и компьютерных игр. Существует много маркерных систем видеоанализа [6]:

1. Оптически пассивные: маркеры отражают свет или инфракрасное излучение, которое посылается с высокочастотных стробоскопов.
2. Оптически активные маркеры излучают свет.
3. Магнитные маркеры – магниты, камеры – ресиверы, позиции маркеров высчитываются по искажениям магнитного потока.
4. Механические: на объект исследования надевается специальный механический тосар-скелет, который повторяет все его движения, в компьютер передаются данные об углах сгибов всех суставов.
5. Гироскопические маркеры – маленькие гироскопы или инерциальные сенсоры, система определяет не только положение маркера в пространстве, но и угол наклона сенсора.

В настоящее время разработаны профессиональные программы и комплексы, позволяющие в реальном времени передавать в компьютер данные о движениях объекта, например DartFish, PFTrack и др., но они являются дорогостоящими системами и доступны далеко не в каждом регионе.

Поскольку в Перми не существует профессиональной студии с системой захвата движения, а готовые программы очень дорогостоящи, было решено создать собственную систему. При этом для осуществления поставленной в работе цели достаточно двумерной системы видеоанализа. Наиболее простыми в изготовлении и дальнейшей обработке являются оптически активные (светящиеся) системы.

## Методика подготовки и проведения эксперимента

**Цель эксперимента:** получение необходимых для моделирования данных: координат плечевых, локтевых суставов и запястий в пространстве и углов между сегментами рук (рис. 2).

**Приборы и материалы:** камера, штатив, шарики для настольного тенниса, суппорты, батарейки CR-2032, батарейные отсеки, светодиоды с большим углом свечения, выключатели, паяльник с припоем, клеевой пистолет.

### *Изготовление маркеров*

Оптически активные маркеры были изготовлены из теннисных шариков со светодиодом внутри. Для создания светящегося маркера использовалась следующая электрическая схема (рис. 3).

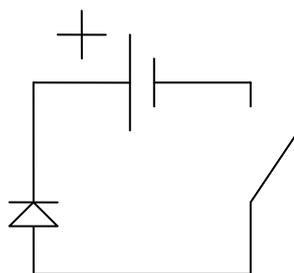


Рис.3. Источник электрического тока, светодиод и выключатель.

Этапы изготовления маркера приведены далее.

1. При помощи клеевого пистолета приклеить выключатель к батарейному отсеку (рис. 4, 5).



Рис. 4. Батарейный отсек и выключатель.



Рис. 5. Батарейный отсек и выключатель.

2. Спаять контакты батарейного отсека и выключателя (рис. 6).

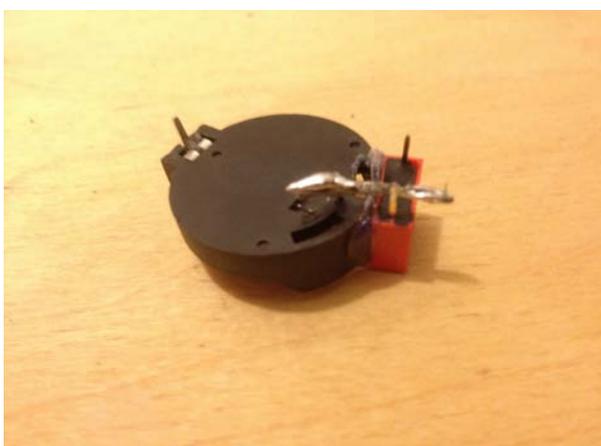


Рис. 6. Батарейный отсек и выключатель

3. Приклеить светодиод на батарейный отсек и замкнуть цепь, припаяв его концы к выключателю и батарейному отсеку (рис. 7).



Рис. 7. Батарейный отсек, выключатель и светодиод

4. В шарике для настольного тенниса вырезать отверстие под светодиод (рис. 8).



Рис.8. Шарик для настольного тенниса.

7. С помощью клеевого пистолета приклеить шарик к схеме (рис. 9, 10).

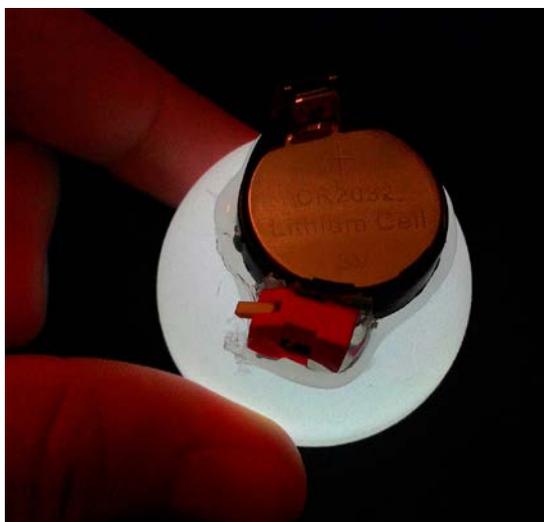


Рис. 9. Готовый маркер

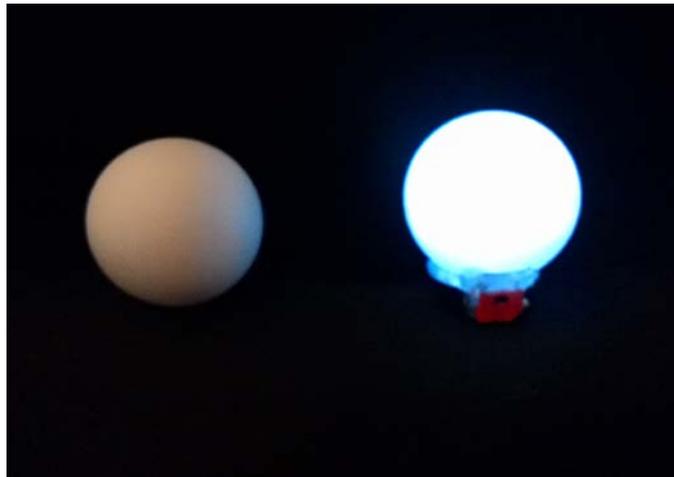


Рис. 10. Готовый маркер рядом с шариком для настольного тенниса

Для крепления маркеров на человеке было решено использовать спортивные суппорты (для запястья и локтевого сустава). Такая система позволяет регулировать положение маркеров на теле человека (рис. 11).



Рис. 11. Маркеры с системой крепления из спортивных суппортов

### ***Видеосъемка***

Для съемки эксперимента использовалась цифровая зеркальная фотокамера Sony Alpha 77, установленная на штативе на высоте ~8 метров над полом. Оптическая плоскость камеры параллельна плоскости, в которой двигаются руки спортсмена. Для фиксации моментов отрыва ног прыгуна от пола и приземления использовалась дополнительная камера, расположенная в вертикальной плоскости.

На человеке, исполняющем прыжок, размещались маркеры (на плечевых, локтевых суставах и запястьях). Более подробно правила расположения маркеров изложены в статье [3].

Испытуемый исполнял несколько туров в один оборот с приземлением на две ноги. Перед каждым прыжком фиксировалось начальное положение: корпус и ноги выпрямлены, руки отведены в стороны (рис. 12). В ходе выполнения маха руками при отталкивании и группировки в фазе полета испытуемый старается не смещать руки из плоскости, перпендикулярной оси вращения.

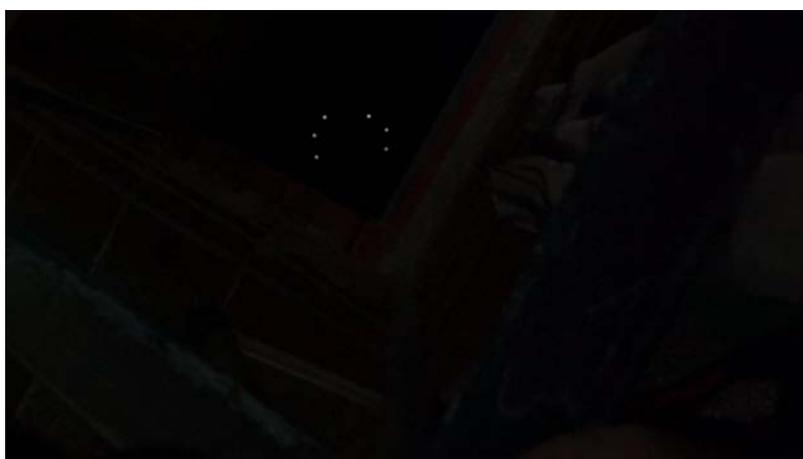


Рис. 12. Кадр из видео, на котором видны маркеры

Для удобства дальнейшей обработки изображения, спортсмену рекомендуется одеться в черную одежду. Кроме того, камера настраивается таким образом, чтобы испытуемый и фон были максимально затемнены и светящиеся маркеры контрастировали со всем остальным изображением.

Для полученного видео исполнения прыжка выполнена раскадровка в программе Free Video to JPG Converter (рис. 12). Дальнейшая обработка получившихся изображений выполнялась в математическом пакете Wolfram Mathematica.

## Обработка эксперимента

В математическом пакете Wolfram Mathematica были созданы программы, позволяющие определить координаты маркеров, углы между сегментами, построить графики зависимости координат и углов от времени и создать анимированную визуализацию движения рук фигуриста.

### *Программа 1. Определение координат маркеров*

Текст программы приведен в Приложении 1. Кадры закачиваются в программу, где сразу же обрезаются так, чтобы была видна только область с маркерами (рис. 13).

```
frameT =  
Table[ImageTrim[frames[[i]],  
  {{0.21 * dims[[1]], 0.98 * dims[[2]]}, {0.6 * dims[[1]], 0.6 * dims[[2]]}},  
  {i, 1, Length[frames]}];  
frameT[[1]]
```

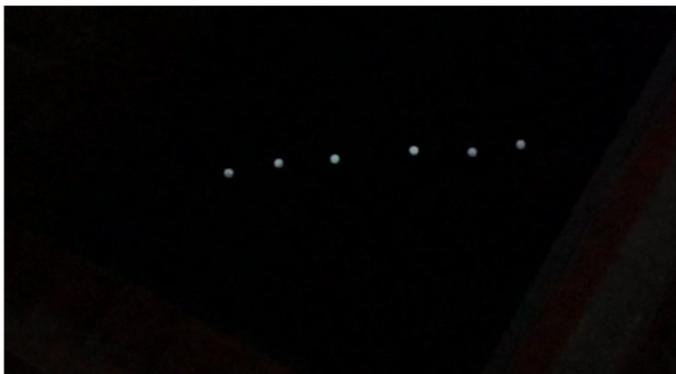


Рис. 13. Скриншот программы в среде Wolfram Mathematica

Затем, при помощи функции `ImageAdjust`, добиться большего контраста изображения. После этого бинаризовать кадры, то есть получить черный фон с шестью белыми точками-маркерами, создать таблицу с координатами центров масс всех точек и подписать точки на всех кадрах. Сохранить получившиеся кадры с подписями и таблицу с координатами на компьютер.

Далее, используя кадры с пронумерованными точками, упорядочить координаты (рис. 14).

Номер кадра	Правое запястье (x, y), пикс.		Угол пр.з-л, °
1	247.09	227.84	175.45
2	247.36	229.33	173.93
3	248.28	230.13	170.54
4	250.06	231.06	166.46
5	252.5	233.14	162.1
6	256.5	237	157.91
7	260.99	243.24	153.41
8	267.35	251.32	149.86
9	274.87	261.59	147
10	283.45	273.07	144.69

Рис. 14. Скриншот таблицы с координатами

### ***Программа 2. Построение графиков***

Текст программы приведен в Приложении 2. Полученные в предыдущем действии координаты загрузить в программу и с помощью функции `ListLinePlot` построить графики движения всех маркеров (рис. 15-21).

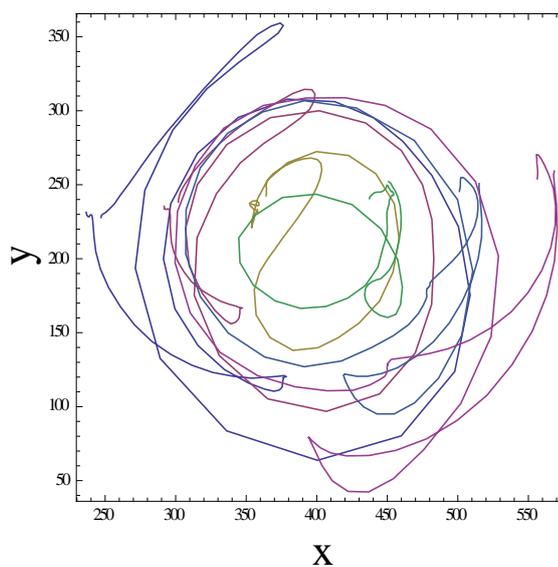


Рис. 15. Траектории движения всех маркеров

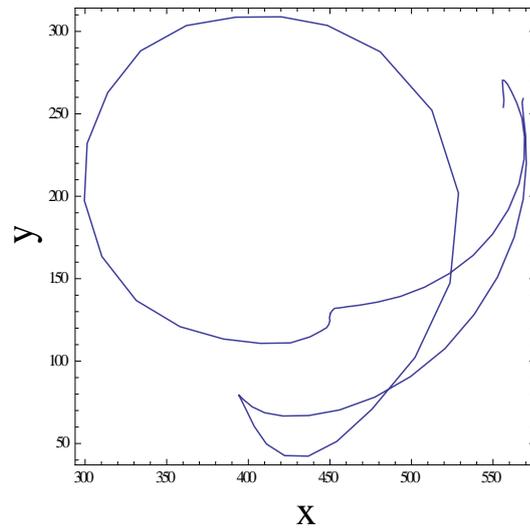


Рис. 16. Траектория движения маркера, размещенного на запястье левой руки

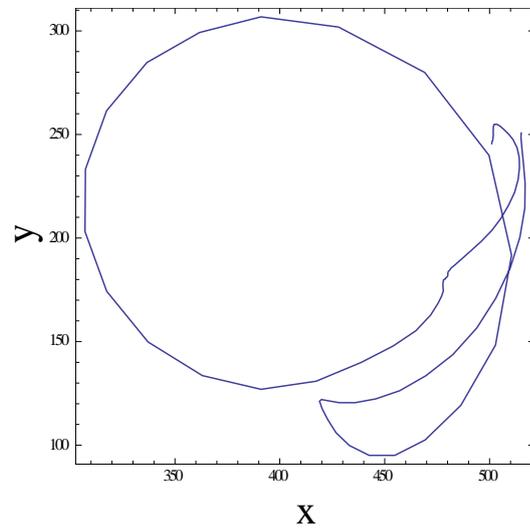


Рис. 17. Траектория движения маркера, размещенного на локтевом суставе левой руки

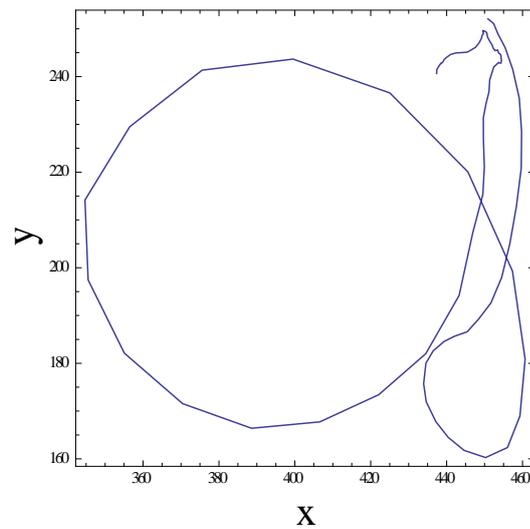


Рис. 18. Траектория движения маркера, размещенного на плечевом суставе левой руки

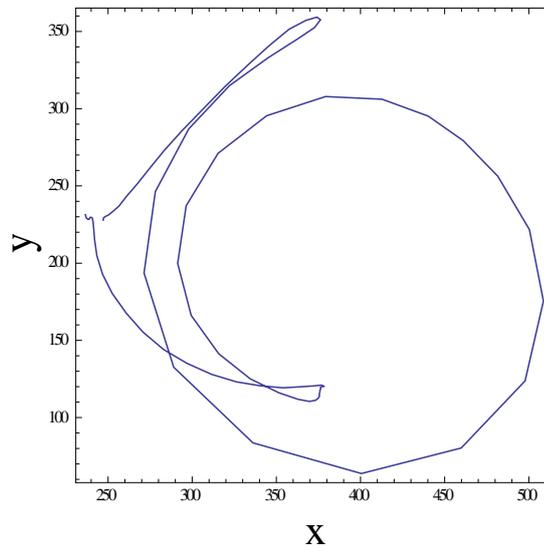


Рис. 19. Траектория движения маркера, размещенного на запястье правой руки

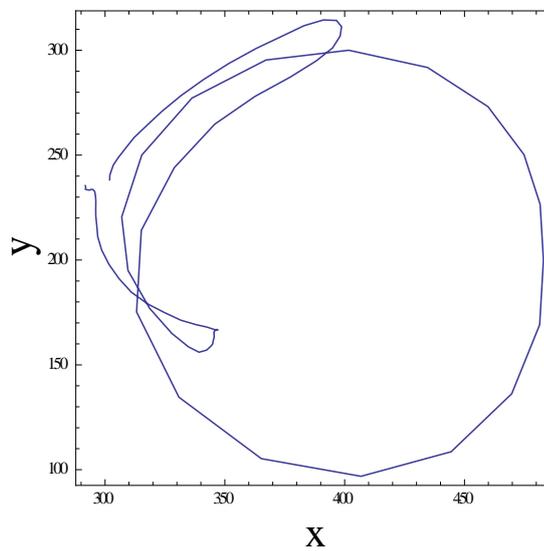


Рис. 20. Траектория движения маркера, размещенного на локтевом суставе правой руки

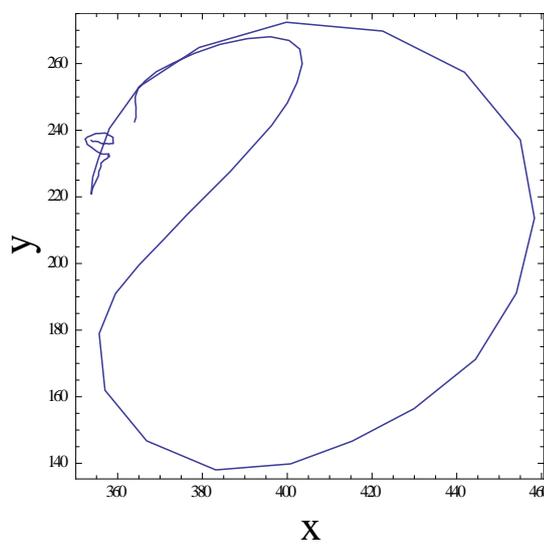


Рис. 21. Траектория движения маркера, размещенного на плечевом суставе правой руки

### ***Программа 3. Нахождение углов***

Текст программы приведен в Приложении 3. Полученные в программе 1 координаты загрузить в программу и построить необходимые векторы с тем, чтобы найти углы между ними с помощью функции `VectorAngle`. Получившиеся таблицы значений сохранить на компьютере.

Создать сводную таблицу координат маркеров и углов между сегментами (Приложение 4).

## **Заключение**

В данной работе разработана система двумерного захвата движения. Для этого разработана методика проведения эксперимента, изготовлен набор маркеров с системой крепления, создан программный комплекс для обработки данных видеосъемки.

На данном этапе проведен эксперимент с одним участником (фигуристом-любителем), произведена обработка экспериментальных данных с помощью разработанного программного комплекса. Получены все необходимые для моделирования данные, которые в дальнейшем планируется использовать для построения математической модели прыжка. Также планируется провести серию экспериментов с фигуристами различного уровня подготовки для идентификации и верификации модели, а также выявления общих тенденций и индивидуальных особенностей исполнения прыжка.

## Список литературы

1. Фигурное катание. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Фигурное\\_катание](https://ru.wikipedia.org/wiki/Фигурное_катание), июнь 2016.
2. Мишин А.Н. Биомеханика движений фигуриста. – М: Физкультура и спорт, 1981. – 144 с.
3. Wu G. ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion – Part II: shoulder, elbow, wrist and hand / Wu G., van der Helm F.C., Veeger H.E., Makhsous M., Van Roy P., Anglin C., Nagels J., Karduna A.R., McQuade K., Wang X., Werner F.W., Buchholz B. // Journal of Biomechanics. – 2005, 38(5). – P. 981-992.
4. Борзиков В.В., Рукина Н.Н., Воробьева О.В., Кузнецов А.Н., Белова А.Н. Видеоанализ движений человека в клинической практике (обзор) // СТМ. – 2015. – Т. 7, №4. – С. 201-210.
5. Скворцов Д.В. Методика исследования кинематики движений и современные стандарты. Видеоанализ // Лечебная физкультура и спортивная медицина. – 2012. – № 12 (108). С. 4-10.
6. Захват движения, [https://ru.wikipedia.org/wiki/Захват\\_Движения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Захват_Движения), октябрь 2016.

## Приложение 1. Программа поиска координат маркеров

```
Directory[]
Dir=NotebookDirectory[]
SetDirectory[Dir]
fn=FileNames[]
frames=Table[Import[fn[[i]]],{i,1,Length[fn]-1}];
frames[[1]]
dims=ImageDimensions[frames[[1]]]
framesT=Table[ImageTrim[frames[[i]],{{0.21*dims[[1]],0.98*dims[[2]]},{0.6*dims[[1]],0.6*dims[[2]]}]],{i,1,Length[frames]};
framesT[[1]]
framesTA=Table[ImageAdjust[framesT[[i]],{0.7,2.9,1.0},{0.3,0.9}],{i,1,Length[framesT]};
framesTA[[1]]
framesTMMB=Table[MorphologicalBinarize[framesTA[[i]]//ImageAdjust],{i,1,Length[framesTA]};
framesTMMB[[1]]
cm=Table[
                                Last@@@ComponentMeasurements[
framesTMMB[[i]],{"Centroid","EquivalentDiskRadius","Area"}],{i,1,Length[framesTMMB]};
disksT=Table[Disk@@@cm[[i,All,{1,2}]],{i,1,Length[cm]};
labelsT=
  Table[
    Text[Style[ToString[j],Bold,Blue,Large],cm[[i,j,1]]],
    {i,1,Length[cm]},
    {j,1,Length[cm[[i]]]};
framesCM=Table[{i,Show[framesT[[i]],Graphics[Join[{Red},disksT[[i]],labelsT[[i]]]}],{i,1,Length[framesT]};
framesCM[[1]]
DirOUT=CreateDirectory[Dir<>"OUT\\Full\\" ]
Directory[]
Do[Export[DirOUT<>ToString[i]<>".jpg",framesCM[[i,2]]],{i,1,Length[framesCM]}]
coords=Join@@@cm[[All,All,1]]
Export[DirOUT<>"all.csv",coords]
```

## Приложение 2. Программа построения графиков и создания анимации для визуализации процесса

```

P3={}
P2={}
P1={}
L1={}
L2={}
L3={}
p1=ListLinePlot[{P3,P2,          P1,          L1,          L2,          L3},
AspectRatio→1,PlotRange→All,
  FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
  Axes→False, Frame→True]
p3=ListLinePlot[{P3}, AspectRatio→1,PlotRange→All,
  FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
  Axes→False, Frame→True]
p2=ListLinePlot[{P2}, AspectRatio→1,PlotRange→All,
  FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
  Axes→False, Frame→True]
p1=ListLinePlot[{P1}, AspectRatio→1,PlotRange→All,
  FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
  Axes→False, Frame→True]
l1=ListLinePlot[{L1}, AspectRatio→1,PlotRange→All,
  FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
  Axes→False, Frame→True]
l2=ListLinePlot[{L2}, AspectRatio→1,PlotRange→All,
  FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
  Axes→False, Frame→True]
l3=ListLinePlot[{L3}, AspectRatio→1,PlotRange→All,
  FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
  Axes→False, Frame→True]
Dir=NotebookDirectory[]Export[Dir<>"г3р@a0фДи8к:
o>б1щИи8й9.emf",p1]
Export[Dir<>"г3р@a0фДи8к:                                п?р@a0в2o>e5
з7a0п?яОсАтВьLe5.emf",p3]
Export[Dir<>"г3р@a0фДи8к: п?р@a0в2ыКй9 л;o>к:o>тВьL.emf",p2]
Export[Dir<>"г3р@a0фДи8к: п?р@a0в2o>e5 п?л;e5чGo>.emf",p1]
Export[Dir<>"г3р@a0фДи8к: л;e5в2o>e5 п?л;e5чGo>.emf",l1]
Export[Dir<>"г3р@a0фДи8к: л;e5в2ыКй9 л;o>к:o>тВьL.emf",l2]
Export[Dir<>"г3р@a0фДи8к: л;e5в2o>e5 з7a0п?яОсАтВьLe5.emf",l3]
pan=Table[Show[ListLinePlot[{P3[[i]],P2[[i]],          P1[[i]],
L1[[i]],          L2[[i]],          L3[[i]]}],
AspectRatio→1,PlotRange→All,ColorFunction→Blue,
  FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
  Axes→False,          Frame→True],
ListPlot[{{0,0},{600,400}},ColorFunction→White,AspectRatio→1,P
lotRange→All,
  FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
  Axes→False, Frame→True],

```

```

ListPlot[{P3[[i]],P2[[i]], P1[[i]], L1[[i]], L2[[i]],
L3[[i]]}, ColorFunction→Red, AspectRatio→1,PlotRange→All,
FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
Axes→False, Frame→True]], {i, 1, 92}]
Export[Dir<>"anim.avi",pan[[All]]]
pan2=Table[Show[ListLinePlot[{P3[[i]],P2[[i]], P1[[i]],
L1[[i]], L2[[i]], L3[[i]]}],
AspectRatio→1,PlotRange→All,ColorFunction→Blue,
FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
Axes→False, Frame→False],
ListPlot[{{0,0},{600,400}},ColorFunction→White,AspectRatio→1,PlotRange→All,
FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
Axes→False, Frame→False],
ListPlot[{P3[[i]],P2[[i]], P1[[i]], L1[[i]], L2[[i]],
L3[[i]]}, ColorFunction→Red, AspectRatio→1,PlotRange→All,
FrameLabel→{Style["x",Large],Style["y",Large] },
Axes→False, Frame→False]], {i, 1, 92}]
Export[Dir<>"anim2.avi",pan2[[All]]]

```

### Приложение 3. Программа поиска углов между сегментами и углов поворота линии плеч относительно первоначального положения

```
P3={}  
P2={}  
P1={}  
L1={}  
L2={}  
L3={}  
P12=(P2-P1)  
P23=(P3-P2)  
L12=(L2-L1)  
L23=(L3-L2)  
PL1P=(P1-L1)  
PL1L=(L1-P1)  
aP12=Table[(VectorAngle[P12[[i]],PL1P[[i]])*180/Pi, {i,  
1,92}]  
aP23=Table[(VectorAngle[P23[[i]],PL1L[[i]])*180/Pi, {i,  
1,92}]  
aL12=Table[(VectorAngle[L12[[i]],PL1L[[i]])*180/Pi, {i,  
1,92}]  
aL23=Table[(VectorAngle[L23[[i]],PL1P[[i]])*180/Pi, {i,  
1,92}]  
Fi=Table[(VectorAngle[PL1P[[1]],PL1P[[i]])*180/Pi, {i, 1,92}]  
Dir=NotebookDirectory[]  
Export[Dir<>"У#г3л;ыКП1fp@a0в2o>e5п1фл;e5чGo>.csv",aP12]  
Export[Dir<>"У#г3л;ыКП1fp@a0в2o>e5п1fp@e5д4п?л;e5чГьLe5.csv",a  
P23]  
Export[Dir<>"У#г3л;ыКЛ1be5в2o>e5п1фл;e5чGo>.csv",aL12]  
Export[Dir<>"У#г3л;ыКЛ1be5в2o>e5п1fp@e5д4п?л;e5чГьLe5.csv",aL2  
3]  
Export[Dir<>"У#г3л;ыКП1fo>в2o>p@o>тBa0.csv",Fi]
```

## Приложение 4. Таблицы с координатами маркеров

Таблица 1. Фрагмент итоговой сводной таблицы с координатами маркеров  
правого запястья, правого локтя и правого плеча, а также углами между  
сегментами

Номер кадра	Правое запястье (x, y), пикс.		Угол пр.з-л, °	Правый локоть (x, y), пикс.		Угол пр.л-п, °	Правое плечо (x, y), пикс.	
1	247.09	227.84	175.45	301.91	238.28	2.27	363.97	242.57
2	247.36	229.33	173.93	301.99	240.42	2.22	364.32	243.88
3	248.28	230.13	170.54	302.69	242.8	1.15	364.29	245.48
4	250.06	231.06	166.46	303.43	245.24	0.26	364.32	246.93
5	252.5	233.14	162.1	305.48	248.72	1.25	364.17	248.45
6	256.5	237	157.91	308.15	252.69	2.44	364.16	250
7	260.99	243.24	153.41	312.02	258.28	3.85	364.8	252.43
8	267.35	251.32	149.86	317.46	264.2	4.88	366.47	254.8
9	274.87	261.59	147	323.87	271.01	5.57	369.11	257.56
10	283.45	273.07	144.69	331.73	278.41	5.12	373.02	260.13
11	294.17	286	143.4	341.19	286.12	4.44	378.05	263.07
12	306.35	299.7	143.7	351.63	293.65	3.29	384.13	265.77
13	319.55	314.43	146.48	363.12	300.88	0.26	390.6	267.5
14	332.97	328.22	151.22	374	306.8	4.01	396.05	268.06
15	345.8	340.9	157.26	383.09	311.74	8.06	400.43	266.96

Таблица 2. Фрагмент итоговой сводной таблицы с координатами маркеров  
левого плеча, левого локтя и левого запястья, а также углами между  
сегментами и углами поворота линии плеч относительно первоначального  
положения

Левое плечо (x, y), пикс.	Угол лев.л-п, °	Левый локоть (x, y), пикс.	Угол лев.з-л, °	Левое запястье (x, y), пикс.	Угол поворота, °			
450.89	252.06	7.43	515.06	250.72	177.16	568.4	259.24	0
450.89	252.06	8.37	514.96	248.73	176.47	567.79	257.03	0.83
452.39	251.1	10.56	515.4	243.45	176.82	568.42	249.8	2.59
453.5	249	12.99	516.16	236.07	179.23	569.93	236.6	4.9
455.43	246.04	16.14	516.92	226.48	174.18	570.28	219.61	7.74
457.41	241.53	19.32	516.8	214.45	167.66	568.44	198.14	11.42
459.15	235.5	22.39	514.41	200.21	162.77	562.87	175.09	16.41
459.76	228.52	24.84	509.87	185.61	156.79	552.7	151	21.97
459.65	220.76	26.94	502.92	170.88	151.9	538.36	128.31	28.35
458.38	212.81	28.74	493.9	156.54	147.48	520.48	107.55	35.23
456.64	204.99	30.69	482.48	143.67	144.25	499.48	90.67	42.69
454.53	197.99	32.85	469.68	133.54	142.07	477.62	78.19	50.15
451.69	192.62	34.47	457.19	126.31	139.57	456	70.43	57.02
448.49	189.29	36	445.74	122.32	137.45	437.07	66.97	62.58
445.41	186.59	37.43	435.9	120.54	135.54	421.25	66.71	67