

# Взаимодействие с виртуальными пультами управления<sup>1</sup>

И.А. Хураськин

**Аннотация.** Задача взаимодействия человека с виртуальными объектами актуальна во многих областях человеческой деятельности, особенно в области тренажеростроения. В данной работе предлагаются методы и подходы для решения задачи взаимодействия с виртуальными пультами управления, которая включает в себя нажатие на виртуальные кнопки, переключение тумблеров, вращение регуляторов и переключателей.

## Введение

Современная тренажерная индустрия находит свое применение в областях, связанных с обучением людей управлению сложными техническими аппаратами и динамическими процессами. Управление такими устройствами ведется с помощью специальных пультов, содержащих кнопки, тумблеры, переключатели и другие элементы управления.

Развитие тренажеростроения с использованием технологий виртуальной реальности ставит задачу реализации взаимодействия человека с пультами управления в виртуальном пространстве. Она состоит из реализации взаимодействия человека, а именно его руки, с кнопками, переключателями, регуляторами и другим элементами управления. Основная цель заключается в корректном формировании визуального представления процесса взаимодействия и отражения динамики движения объектов в соответствии с законами физики.

В данном исследовании мы считаем, что обратного воздействия на человека со стороны виртуальных объектов нет, поэтому движение человека в виртуальном пространстве ничем не ограничивается и в решении задачи следует учитывать существование нереального поло-

жения и движения человека относительно виртуальных объектов, например, пересечение им объектов или перемещение внутри них.

Задача взаимодействия включает в себя определение столкновения фигуры человека с виртуальными объектами [1]. Для решения этой подзадачи человек и виртуальные объекты окружаются примитивными геометрическими фигурами, называемые ограничивающими объемами [2]. В решении наших задач в роли ограничивающих объемов выступают параллелепипеды (боксы). Для более точного описания сложные по форме объекты окружаются сразу несколькими боксами. Сначала положение и ориентация человека (а именно окружающих его боксов) определяется в реальном пространстве. На основе заранее определенного соотношения между реальным пространством и виртуальным вычисляется положение этих боксов в виртуальном пространстве. Их совокупность будет определять виртуальный образ человека. Определение столкновения будет заключаться в нахождении пересечения параллелепипедов, принадлежащих к образу человека, с боксами, которые окружают виртуальные объекты.

В данном исследовании мы считаем, что во взаимодействии участвует только палец человека, окруженный одним боксом. При столкно-

---

Работа выполняется при поддержке РФФИ (грант № 06-07-89041-а)

вении пальца с каким-либо объектом определяется область пересечения бокса пальца с боксами объекта. Стоит заметить, что результатом пересечения бокса пальца и одного бокса объекта будет выпуклый многогранник.

При столкновении необходимо определить дальнейшее движение виртуальных объектов. Для обеспечения реалистичности этого движения необходимо, чтобы скорости и геометрические свойства объектов менялись в соответствии с законами физики [3].

В данной статье будут рассмотрены частные случаи взаимодействия человека с виртуальными объектами, а именно, нажатие на виртуальные кнопки, переключение тумблеров, вращение переключателей и регуляторов. В каждом случае рука человека будет выступать некоторым внешним объектом, который до столкновения с рассматриваемым объектом поступательно движется в виртуальном пространстве с определенной скоростью и в определенном направлении.

## 1. Нажатие на виртуальные кнопки

Кнопки по количеству возможных положений можно классифицировать на однопозиционные и двухпозиционные. Однопозиционные кнопки могут занимать только одно неподвижное положение в свободном от воздействия состоянии. Их нажатие, как правило, сигнализирует о выполнении определенной команды, например, о запуске какого-либо процесса. Двухпозиционные кнопки могут находиться в двух положениях – нажатом или отжатом. Поэтому их функциональность основана на выполнении двух противоположных операций, например, включение – выключение или запуск – останов. Рассмотрим динамику движения обоих типов кнопок отдельно.

Можно выделить три состояния движения однопозиционной кнопки:

- 1) свободное состояние (нет внешней силы);
- 2) процесс нажатия под действием внешней силы;
- 3) процесс отжатия (внешняя сила присутствует).

На Рис. 1 представлена диаграмма переходов из одного состояния в другое. При отсутствии какого-либо внешнего воздействия кнопка

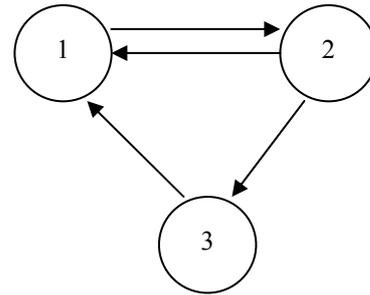


Рис. 1

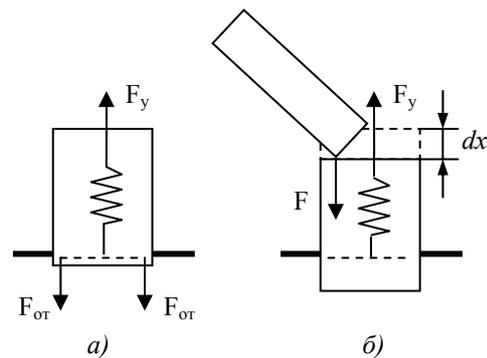


Рис. 2

находится в свободном состоянии. В этом состоянии кнопка либо имеет неподвижное положение (Рис. 2, а), либо движется под действием сил упругости. Появление внешней силы  $F$  со стороны столкнувшегося объекта может привести к нажатию кнопки и к ее переходу во второе состояние. Это может произойти в том случае, если проекция силы  $F$  на ось движения кнопки превышает силу упругости пружины кнопки  $F_y$ . Во втором состоянии предполагается, что кнопка и внешний предмет имеют непосредственный контакт. Перемещение объекта воздействия в пространстве в направлении углубления кнопки сопровождается перемещением кнопки вдоль своей оси симметрии на расстояние, которое позволит кнопке только касаться объекта и не пересекать его (Рис. 2, б). Причем кнопка не может продолжать самостоятельного движения в случае остановки объекта воздействия, поскольку приобретенная скорость практически сразу уменьшается до нуля под воздействием силы упругости. Перемещение вследствие действия силы  $F$  может продолжаться до тех пор, пока кнопка не достигнет предельного углубления, где она упру-

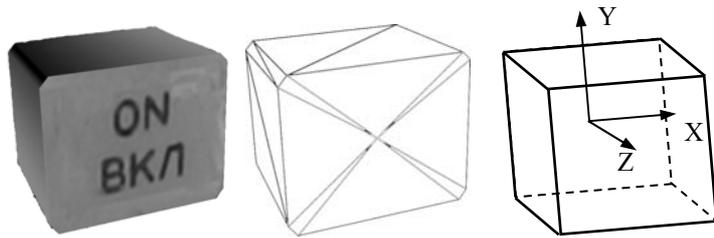


Рис. 3

ся в какой-либо ограничитель. При достижении ограничителя внутренний механизм сгенерирует сигнал, который будет интерпретироваться как некоторая команда для определенного процесса. В этот момент кнопка условно переходит в состояние отжатия и будет находиться в нем до тех пор, пока объект соприкасается с ней. При потере контакта внешнего объекта с кнопкой ее состояние меняется на свободное. Если в этот момент сила упругости  $F_y$  не будет уравновешена силами отталкивания  $F_{от}$ , то кнопка приобретет ускорение, которое переместит ее в исходное положение, где она остановится под воздействием сил отталкивания.

Рассмотрим реализацию нажатия кнопки в виртуальном пространстве. Кнопка имеет геометрическую форму, близкую к форме параллелепипеда, поэтому для нее ограничивающим объемом будет один бокс (Рис. 3). Локальная система координат кнопки выбирается так, чтобы оси были параллельны ребрам бокса и ось  $Z$  была направлена вдоль оси движения от нижнего основания к верхнему, а точка начала координат располагалась в центре нижнего основания.

В исходном положении кнопка находится в свободном состоянии. При пересечении кнопки с внешним объектом воздействия (виртуальным образом человеческого пальца) проверяется условие нажатия кнопки, которое состоит в выполнении следующих пунктов:

- 1) верхнее основание бокса кнопки должно содержать область пересечения;
- 2) вектор направления движения объекта в системе координат кнопки должен иметь тупой угол с осью  $Z$ .

В случае успеха кнопка переходит во второе состояние, где, исходя из области пересечения, определяется сдвиг кнопки вдоль оси  $Z$ . Для

этого набор точек, образующих многогранник пересечения, переводится в систему координат кнопки, после чего находится точка с наименьшим значением координаты  $Z$ . Расстояние между этой точкой и верхней гранью бокса кнопки и будет величиной сдвига кнопки в обратном направлении относительно оси  $Z$ . Дальнейшее движение объекта может создавать новое пересечение, которое приведет к дополнительному сдвигу. Такой процесс может продолжаться до тех пор, пока сдвиг кнопки относительно исходного положения не достигнет своего предельного значения. В этом случае кнопка будет находиться в предельном сдвинутом положении и перейдет в третье состояние.

Когда объект воздействия "покидает" область бокса кнопки, она переходит в свободное состояние. При отсутствии внешнего воздействия на кнопку вдоль оси  $Z$  будет действовать сила упругости, величина которой определяется уравнением

$$F_y = -k \cdot x = m \cdot a ,$$

где  $k$  – коэффициент жесткости пружины,  $x$  – сжатие пружины, представляющее сумму расстояний – деформации пружины в исходном положении кнопки  $dx_0$  и сдвига кнопки  $dx_1$ ,  $m$  – масса кнопки,  $a$  – ускорение. Сдвиг кнопки  $dx_1$  соответствует моменту, в который на кнопку перестает действовать внешняя сила (кнопка отпускается). Действие силы  $F_y$  приводит к движению кнопки в соответствии с законом свободного колебания. Уравнение свободного колебания выводится исходя из зависимости величины силы упругости от величины сжатия пружины. Уравнение  $-k \cdot x = m \cdot a$  представляется в дифференциальной форме  $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$ . Решением этого

дифференциального уравнения с учетом начального условия, а именно, сжатия пружины на расстояние  $(dx_0+dx_1)$ , будет уравнение

$$x = (dx_0 + dx_1) \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) \quad (1)$$

Из этого уравнения следует, что зависимость смещения кнопки  $dx$  относительно исходного положения от времени будет иметь выражение

$$dx = (dx_0 + dx_1) \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) - dx_0 \quad (2)$$

На Рис. 4 представлен график этого уравнения, представляющий косинусоиду с амплитудой  $(dx_0+dx_1)$  и периодом  $T_w = 2\pi\sqrt{m/k}$ . Достигнув исходного положения, в котором  $dx=0$ , кнопка прекращает дальнейшее движение под действием сил отталкивания упора  $F_{от}$ . Подставляя  $dx=0$  в уравнение (2), находим, что этот момент наступает при  $T'=T_w \arccos(dx_0/(dx_0+dx_1))/2\pi$ . Итак, движение кнопки в свободном состоянии выражается зависимостью смещения кнопки от времени

$$dx = \begin{cases} (dx_0 + dx_1) \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) - dx_0; & 0 \leq t \leq T' \\ 0; & t > T' \end{cases}$$

На Рис. 4 эта зависимость представлена сплошной линией.

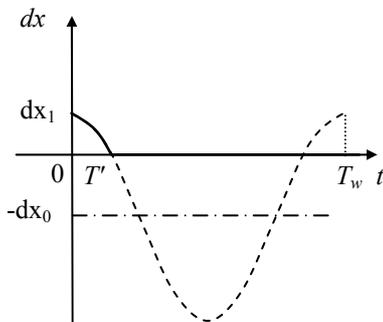


Рис. 4

Для двухпозиционной кнопки можно выделить шесть состояний движения:

1. свободное состояние в первой позиции;
2. нажатие в первой позиции;
3. отжатие во второй позиции;
4. свободное состояние во второй позиции;
5. нажатие во второй позиции;
6. отжатие в первой позиции.

Диаграмма переходов из одного состояния в другое представлена на Рис. 5. Условия пере-

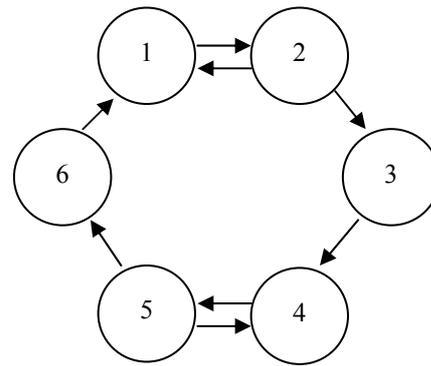


Рис. 5

хода для однопозиционной и двухпозиционной кнопок совпадают, а именно, переход из свободного состояния в состояние нажатия производится в момент прикладывания к кнопке внешней силы, из состояния нажатия в состояние отжатия при достижении кнопкой крайнего положения и продолжающемся внешнем воздействии, а переход в свободное состояние — при прекращении действия внешней силы. Первая и вторая позиции отличаются тем, что свободные состояния имеют разную углубленность кнопки при ее неподвижном положении и переход из нажатого состояния в отжатое сопровождается выполнением разных команд.

Реализация нажатия двухпозиционной кнопки в виртуальном пространстве повторяет реализацию для однопозиционной кнопки (динамику движения и условия переходов), но с учетом шести состояний и двух позиций. Движение кнопки в свободном состоянии для первой позиции будет таким же, как и для однопозиционной кнопки, а для второй позиции будет отличаться моментом прекращения движения. Этот момент наступит, когда смещение кнопки  $dx$  будет равно смещению кнопки  $\Delta x$  во второй позиции относительно первой. Подставляя  $dx=\Delta x$  в уравнение (2), получим, что этот момент равен  $T'=T_w \arccos((dx_0+\Delta x)/(dx_0+dx_1))/2\pi$ .

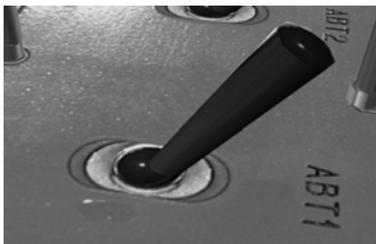
Для определения динамики движения кнопок необязательно задавать коэффициент жесткости  $k$  и массу  $m$  виртуальной кнопки, достаточно путем подбора определить отношение  $k/m$  для достижения необходимого визуального эффекта. С учетом того, что время в настоящей работе измеряется в секундах, нами было подобрано отношение, равное 2.

## 2. Переключение виртуальных тумблеров

Тумблер представляет собой электронное устройство (Рис. 6, а), предназначенное для выполнения двух противоположных операций, таких как включение – выключение, запуск – останов и т.п. Тумблер может принимать два неподвижных положения, переход между которыми осуществляется путем его поворота вокруг оси, расположенной у основания.

При воздействии на тумблер некоторой силы  $F$  (Рис. 7) его движение будет зависеть от величины момента силы относительно оси вращения. Моментом является векторное произведение радиус-вектора  $r_{\perp}$  в точке приложения силы с составляющей  $F_{\perp}$ , образованной путем проекции силы  $F$  на плоскость вращения. Если величина момента силы  $F$  превышает момент силы упругости тумблера  $F_y$ , то тумблер приобретает ускорение и начинает вращение в направлении вектора  $F_{\perp}$ .

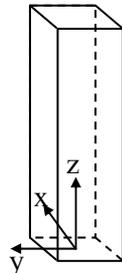
Величина силы упругости зависит от положения тумблера, а точнее, от угла его поворота вокруг оси. Направление силы всегда перпендикулярно оси тумблера и оси его вращения. Возьмем за точку отсчета углов поворота середину между крайними положениями тумблера. В нулевом по-



а)



б)



в)

Рис. 6

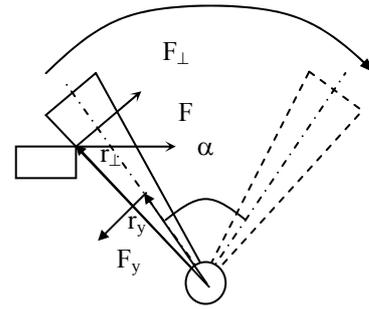


Рис. 7

ложении тумблера величина силы упругости равна 0. При повороте тумблера в одну из сторон относительно точки отсчета величина силы упругости увеличивается пропорционально углу поворота. Находясь в нулевом положении, тумблер неподвижен, но при малейшем повороте возникающая сила упругости приводит тумблер в движение и поворачивает его в одно из крайних положений, где силе упругости противостоит сила отталкивания. Для определения динамических параметров тумблера следует рассматривать не саму силу упругости, а ее момент относительно оси вращения, поскольку движение тумблера зависит не только от величины силы, но и от плеча, в точке которого приложена эта сила. Величина момента силы упругости выражается следующим образом:

$$\vec{M} = (\vec{F}_y, \vec{r}_y) = f(\gamma) \cdot \vec{e},$$

где  $f$  – функция зависимости величины момента силы от угла поворота тумблера  $\gamma$ , а  $e$  – единичный вектор, направленный вдоль оси вращения.

Итак, для осуществления переключения из крайнего положения необходимо приложить силу, момент которой должен превышать момент силы упругости и должен быть направлен в противоположную относительно него сторону. Действие этой силы должно продолжаться до тех пор, пока тумблер не достигнет нулевой отметки, после чего возникновение сонаправленной силы упругости приведет к самостоятельному движению тумблера в направлении точки второго положения.

Рассмотрим реализацию переключения тумблера в виртуальном пространстве. Геометрическая форма тумблера, как правило, представляет собой либо усеченный конус, либо

цилиндр (Рис. 6, а, б). Форму тумблера достаточно описать одним боксом. Локальная система координат задается таким образом, чтобы ось  $Z$  проходила вдоль оси симметрии тумблера, а оси  $X$  и  $Y$  располагались в плоскости нижнего основания, причем ось  $Y$  выступала осью вращения (Рис. 6, в). Ограничивающий бокс ориентирован так, чтобы его ребра были параллельны осям.

В исходном состоянии тумблер находится в одном из двух крайних положений. Крайнее положение, в котором тумблер будет повернут по часовой стрелке относительно оси  $Y$  (если смотреть из ее начала), имеет угол поворота  $\phi$ . Соответственно, в другом крайнем положении он будет иметь поворот  $-\phi$ . Движение же он может осуществлять в диапазоне  $[-\phi, \phi]$ . При пересечении объекта воздействия с тумблером производится проверка на выполнение условия поворота. Это условие состоит в следующем:

1. проекция направления движения объекта воздействия (а соответственно, и направления силы) на ось  $X$  системы координат тумблера не должна быть нулевой;

2. область пересечения не должна входить в область цилиндра, образованного вращением нижнего основания бокса вокруг оси  $Y$ ;

3. область пересечения должна иметь общие точки с одной и только одной гранью бокса, пересекаемой осью  $X$ .

Первый пункт условия необходим для проверки существования момента силы, действующей со стороны объекта. Мы считаем, что сила упругости тумблера намного меньше силы, действующей со стороны человека, поэтому существование ненулевого момента силы всегда будет приводить к движению тумблера. Выполнение двух последующих пунктов необходимо для определения угла поворота тумблера. Они вполне приемлемы в рамках решаемой задачи. Второй пункт не позволяет осуществлять поворот тумблера при приложении силы к точке нижнего основания (или рядом с ней), что вполне естественно. Третий пункт нарушается в двух случаях. В первом случае область пересечения имеет общие точки с двумя противоположными гранями, пересекаемыми осью  $X$ . Пересечение этих граней бокса может произойти при движении объекта в

направлении, перпендикулярном (или близкими к перпендикулярному) к оси  $X$  тумблера, что соответствует образованию силы с нулевым моментом. Их пересечение также может произойти, когда скорость объекта настолько велика, что его положение удастся зафиксировать уже при пересечении обеих граней бокса, что возможно только при низкой частоте обновления информации о положении. В рамках решаемой задачи мы считаем, что скорость объекта не настолько велика, чтобы он мог пройти расстояние, большее ширины бокса, за время обновления информации о его положении. Во втором случае область пересечения не имеет общих точек ни с одной гранью, пересекаемой осью  $X$ , что говорит о приложении силы к граням параллельным к этой оси. Эти грани не выполняют роль упора для образования движения тумблера, поэтому приложение силы к ним не может повлиять на движение.

При выполнении условия поворота тумблер должен быть повернут вокруг оси  $Y$  на угол, позволяющий ему покинуть область пересечения. Как уже было сказано, результатом пересечения объекта воздействия с боксом тумблера будет выпуклый многогранник. Задача состоит в определении такого угла  $v_{\max}$ , на который необходимо повернуть тумблер, чтобы многогранник не пересекался с боксом тумблера. Определим грань, которая перпендикулярна оси  $X$  и содержит область пересечения. Из условия эта грань единственная. Поскольку многогранник расположен внутри бокса тумблера, то все его точки будут находиться с одной стороны плоскости определенной нами грани, назовем эту сторону внутренней. Для выполнения задачи достаточно повернуть тумблер так, чтобы многогранник оказался с другой стороны плоскости и касался ее, назовем эту сторону внешней. В таком случае тумблер и многогранник окажутся в противоположных сторонах относительно плоскости и пересекаться не будут.

Областью касания плоскости с выпуклым многогранником является либо вершина, либо ребро, либо грань, т.е. область всегда содержит вершину многогранника. Значит, искомый поворот будет устанавливаться плоскость грани на пересечении с одной из вершин. Поэтому достаточно проанализировать только повороты

тумблера, для которых плоскость грани будет пересекать одну из вершин многогранника, и выбрать такой поворот, который будет удовлетворять условию расположения многогранника относительно плоскости. Из условия, что область пересечения не входит в область цилиндра, образованного вращением нижнего основания вокруг оси  $Y$  (а при вращении тумблера вышеупомянутая грань всегда будет касаться этого цилиндра) выходит, что всегда найдется такой поворот, при котором область пересечения будет полностью находиться с внешней стороны плоскости грани, т.е. решение поставленной задачи существует всегда.

Рассмотрим две вершины  $P_1$  и  $P_2$ , принадлежащие области пересечения (Рис. 8, а). Для их пересечения плоскостью грани необходимо выполнить повороты на углы  $v_1$  и  $v_2$  соответственно. Направление поворотов определяется исходя из положения вышеопределенной грани относительно плоскости  $YZ$ . Если она расположена в положительной области по оси  $X$ , то повороты осуществляются по часовой стрелке, иначе против часовой стрелки. Если угол  $v_1$  меньше угла  $v_2$ , то при повороте на угол  $v_1$  точка  $P_2$  будет оставаться с внутренней стороны плоскости грани, а при повороте на угол  $v_2$ , точка  $P_2$  будет находиться на плоскости, а точка  $P_1$  - с внешней стороны плоскости. Чем больше угол поворота, тем большая часть области пересечения оказывается с внешней стороны, поэтому необходимо найти такую вершину, для которой угол поворота будет максимальным. Этим углом и будет искомый угол  $v_{max}$ .

Определим угол  $v$ , на который необходимо повернуть тумблер, чтобы плоскость заданной грани пересекала вершину  $P$  (Рис. 8, б) с координатами  $(x, y, z)$  в системе координат тумблера. Угол можно определить из уравнения

$$\cos(\mu - v) = \frac{W}{2L},$$

где  $\mu$  – угол между перпендикуляром из точки  $P$  на ось  $Y$  и плоскостью  $XZ$ ,  $L$  – длина этого перпендикуляра, которая равна  $L = \sqrt{x^2 + z^2}$ ,  $W$  – ширина бокса по оси  $X$ .

Получаем, что

$$v = \mu - \arccos\left(\frac{W}{2L}\right) = \arccos\left(\frac{x}{L}\right) - \arccos\left(\frac{W}{2L}\right)$$

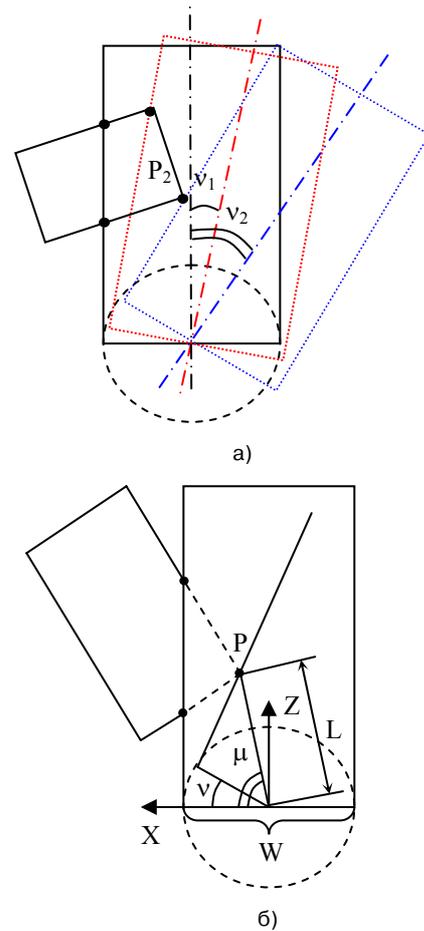


Рис. 8

Определяя угол  $v$  для каждой вершины многогранника, находим максимальный угол  $v_{max}$ . Если тумблер необходимо повернуть против часовой стрелки, то из текущего угла поворота вычитается  $v_{max}$ , если по часовой стрелки, то к текущему углу прибавляется  $v_{max}$ . Если результирующий угол поворота выходит из диапазона  $[-\phi, \phi]$ , то значение  $v_{max}$  корректируется до угла, который не позволит выйти из диапазона.

После поворота, освободившись от воздействия со стороны объекта и силы отталкивания, тумблер начинает самостоятельное движение под действием силы упругости. Поскольку точно не известно, как действует сила упругости, мы моделируем ее как величину, напрямую зависящую от угла поворота тумблера  $\gamma$ , т.е.  $F_y = k_y \gamma$ , где  $k_y$  – некоторый коэффициент жесткости. Вращение тумблера под действием этой силы моделируется следующей зависимостью:

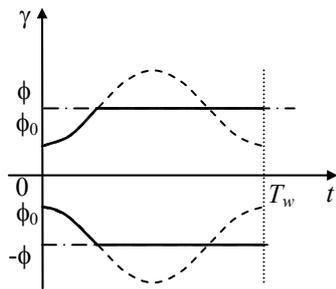


Рис. 9

$$\varphi = A \sin\left(\sqrt{\frac{k_y}{m}}t\right) + \phi_0, \quad (3)$$

где  $A$  – некоторая амплитуда колебания,  $m$  – масса тумблера,  $\phi_0$  – угол, из которого тумблер начинает самостоятельное движение. Отсюда период колебания равен  $T_w = 2\pi\sqrt{m/k_y}$ . Амплитуда колебания выбирается исходя из угла поворота  $\phi$  при крайнем положении тумблера и угла  $\phi_0$  и берется равной  $(\phi - \phi_0)$  из соображения, что скорость движения не должна спадать, пока тумблер не достигнет предельного положения. Описанная модель зависит от знака угла  $\phi_0$ . Если знак  $\phi_0$  положительный, то вращение осуществляется в положительном направлении, если отрицательный, то вращение будет в обратном направлении. Движение тумблера с учетом его начального положения  $\phi_0$  описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \gamma &= (k\phi - \phi_0) \sin\left(\sqrt{\frac{k_y}{m}}t\right) + \phi_0 = \\ &= (k\phi - \phi_0) \sin\left(\frac{2\pi}{T_w}t\right) + \phi_0, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $k$  – коэффициент, значение которого равно 1 при  $\phi_0 \geq 0$  и -1 при  $\phi_0 < 0$ . На Рис. 9 представлен график зависимости поворота тумблера от времени (он выделен сплошной линией) с начальным углом  $\phi_0$ . Движение продолжается до тех пор пока тумблер не достигнет крайнего положения, где  $\gamma = \pm\phi$ , после чего он останавливается под действием сил отталкивания упоров. Подставляя значение

$\gamma = \phi$  в уравнение (4), находим момент времени, когда это произойдет

$$\begin{aligned} T' &= \frac{T_w}{2\pi} \arcsin((\phi - \phi_0)/(\phi - \phi_0)) = \\ &= T_w \frac{\pi/2}{2\pi} = \frac{T_w}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{m/k_y}. \end{aligned}$$

Итак, движение тумблера можно описать следующей системой уравнений:

$$\gamma = \begin{cases} (\varphi - \phi_0) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_w}t\right) + \phi_0; & 0 \leq t \leq T', \varphi_0 \geq 0 \\ \varphi; & t > T', \varphi_0 \geq 0 \\ -(\phi_0 + \varphi) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_w}t\right) + \phi_0; & 0 \leq t \leq T', \varphi_0 < 0 \\ -\varphi; & t > T', \varphi_0 < 0. \end{cases}$$

### 3. Вращение виртуальных переключателей

Переключатель представляет собой электронное устройство, которое в основном управляет режимами работы какого-либо процесса или регулирует динамику процесса (Рис. 10, а). Устройство представляет собой ручку с ребрами упора. Управление происходит вращением переключателя вокруг оси с установкой указателя в нужном направлении. Устройство может иметь фиксированное количество положений. Находясь в состоянии, свободном от стороннего воздействия, переключатель занимает одно из этих положений. Такая реализация используется для переключения режимов. В случае, если переключатель не имеет фиксированных положений, он свободно вращается вокруг своей оси и может быть повернут на любой угол в границах диапазона вращения.

Переключатель можно охарактеризовать тремя параметрами:

1. количеством ребер упора;
2. количеством фиксированных положений, если они есть;
3. диапазоном вращения.

Вращение переключателя осуществляется путем приложения силы к одному или к нескольким ребрам, причем момент силы относительно оси вращения не должен быть нулевым.

Если переключатель без фиксированных положений, то действию силы будет препятствовать сила трения, поэтому после окончания воздействия его движение прекратится под действием этой силы. Устройства с фиксированным количеством положений испытывают воздействия собственно внешней силы, сил сопротивления, трения и упругости. При отсутствии действия внешней силы сила упругости устанавливает переключатель в одно из фиксированных положений. По сути, действие силы упругости переключателя схоже с действием силы упругости тумблера с тем различием, что сила упругости возвращает тумблер в одно из крайних положений, а сила упругости переключателя возвращает в фиксированное положение, к которому он находится ближе всего.

Рассмотрим реализацию взаимодействия с переключателем в виртуальном пространстве. Переключатель имеет достаточно сложную геометрическую форму, поэтому для описания ограничивающего объема необходимо использовать несколько боксов. Каждое ребро переключателя окружается параллелепипедом, совокупность которых образует конечный ограничивающий объем (Рис. 10, б). Каждый параллелепипед (бокс) располагается так, что вдоль оси нижнего основания проходит ось вращения тумблера. Каждый бокс обладает своей локальной системой координат, у которой ось Z направлена вдоль оси симметрии ребра, ось Y совпадает с осью вращения, а ось X проходит вдоль другой оси симметрии нижнего основания (Рис. 10, в).

Одно из крайних положений переключателя берется за точку отсчета его поворота.

При пересечении объекта воздействия с одним из боксов производится проверка на возможность поворота переключателя. Она заключается в выполнении таких же условий для пересеченного бокса, которые были определены для тумблера. При выполнении всех условий определяется угол поворота, на который необходимо повернуть переключатель, в ином случае считается, что переключатель повернуть нельзя независимо от результата проверки с другими боксами ограничивающего объема. Угол вычисляется таким же методом, как и для бокса тумблера. Определенный угол поворота

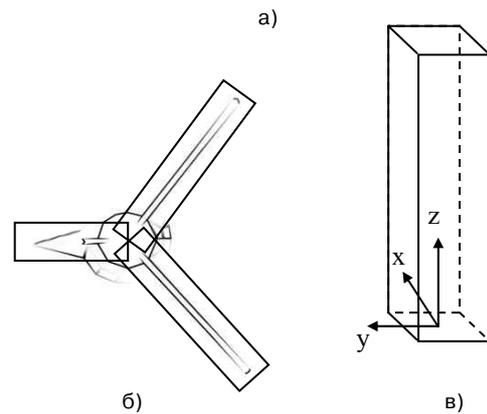


Рис. 10

прибавляется или вычитается из текущего угла и производится проверка выхода из допустимого диапазона вращения. Если это происходит, то определенный угол корректируется.

Если воздействие внешнего объекта прекратилось, дальнейшее вращение переключателя зависит от того, имеет ли он фиксированные положения или нет. Если нет, то переключатель дальше не вращается. Иначе под воздействием силы упругости он движется в одно из фиксированных положений. Динамика движения переключателя схожа с движением тумблера, поэтому считаем, что действия сил упругости тумблера и переключателя выполняются по одному закону.

Пусть в момент освобождения от воздействия переключатель имеет угол поворота  $\phi_0$ , находящийся между углами  $\phi_i$  и  $\phi_{i+1}$  двух соседних фиксированных положений. Динамика вращения под действием силы упругости будет выражена зависимостью

$$\gamma = A \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) + \phi_0, \quad (5)$$

где  $A$  – некоторая амплитуда колебания,  $m$  – масса переключателя,  $k$  – некоторый коэффициент жесткости. В зависимости от того, к какому углу из  $\phi_i$  и  $\phi_{i+1}$  ближе  $\phi_0$ , выбирается амплитуда, равная либо  $(\phi_i - \phi_0)$ , либо  $(\phi_{i+1} - \phi_0)$ , и направление движения с выбором в сторону ближнего фиксированного положения. Период колебания берется равным  $T_w = 2\pi\sqrt{m/k}$ . Получаем, что вращение будет выражаться уравнениями, зависящими от начального угла поворота:

$$\begin{cases} \gamma = (\phi_{i+1} - \phi_0) \sin\left(\frac{2\pi}{T_w}t\right) + \phi_0; & \phi_0 \geq \Psi_0 \\ \gamma = (\phi_i - \phi_0) \sin\left(\frac{2\pi}{T_w}t\right) + \phi_0; & \phi_0 < \Psi_0 \end{cases}, \quad (6)$$

где  $\Psi_0 = (\phi_{i+1} + \phi_i)/2$ .

Движение переключателя прекратится в тот момент, когда переключатель достигнет одного из фиксированных положений  $\phi_i$  или  $\phi_{i+1}$ . Подставляя в (6) значение  $\gamma$ , равное  $\phi_i$  или  $\phi_{i+1}$ , получим время остановки переключателя

$$\begin{aligned} T' &= \frac{T_w}{2\pi} \arcsin((\phi_{i+1} - \phi_0)/(\phi_{i+1} - \phi_0)) = \\ &= T_w \frac{\pi/2}{2\pi} = \frac{T_w}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{k}}. \end{aligned}$$

Итак, конечная система уравнений, описывающая зависимость угла поворота переключателя  $\gamma$  от времени имеет вид:

$$\gamma = \begin{cases} (\phi_{i+1} - \phi_0) \sin\left(\frac{2\pi}{T_w}t\right) + \phi_0; & 0 \leq t \leq T', \phi_0 \geq \Psi_0 \\ \phi_{i+1}; & t > T', \phi_0 \geq \Psi_0 \\ (\phi_i - \phi_0) \sin\left(\frac{2\pi}{T_w}t\right) + \phi_0; & 0 \leq t \leq T', \phi_0 < \Psi_0 \\ \phi_i; & t > T', \phi_0 < \Psi_0 \end{cases}$$

#### 4. Вращение виртуальных регуляторов

Регулятор обычно имеет вид цилиндрической ручки (Рис. 11, а) и предназначен для регулирования динамики каких-либо процессов. Управление процессом происходит путем поворота ручки вокруг ее оси, что приводит к

увеличению или уменьшению величины, отвечающей за динамику этого процесса.

С физической точки зрения вращение регулятора осуществляется путем приложения силы, момент которой относительно оси вращения не равен нулю. Направление и скорость вращения определяется величиной этой силы и точкой ее приложения. Движение продолжается до тех пор, пока сила действует с ненулевым моментом относительно оси. Когда же момент становится равным нулю, вращение регулятора прекращается из-за сопротивления сил трения.

Рассмотрим реализацию вращения регулятора в виртуальном пространстве. Для этого сначала необходимо задать ограничивающий объем регулятора. Вследствие его цилиндрической формы подходящий объем формируется из нескольких боксов, например, трех (Рис. 11, б). Каждый бокс располагается так, чтобы его ось симметрии совпадала с осью вращения регулятора. Для удобства анализа пересечения для каждого бокса определяется своя система координат, у которой ось  $Z$  направлена вдоль оси вращения регулятора, а оси  $X$  и  $Y$  располагаются параллельно ребрам на грани, лежащей на нижнем основании регулятора. За систему координат регулятора берется система координат одного из боксов.

При пересечении объекта воздействия с одним из боксов производится проверка на возможность вращения регулятора при таком воздействии. Для этого необходимо знать направление действующей силы со стороны объекта и точку ее приложения. Их можно найти исходя из того, что направление силы совпадает с направлением движения объекта воздействия, а точкой приложения силы является точка касания  $P=(x, y, z)$  объекта с регулятором (на Рис. 12 это точка  $P_0$ ). Мы считаем, что вращение можно осуществлять только в том случае, если сила прикладывается к боковой поверхности регулятора, поэтому, если точка касания находится в области верхнего или нижнего основания, то воздействие не приводит к вращению. При выполнении данного условия определяется момент силы относительно оси вращения регулятора. Для этого в системе координат на основе точки  $P=(x, y, z)$  приложения силы и вектора направления  $F=(v_x, v_y, v_z)$

определяются два вектора  $R=(x, y, 0)$  и  $T=(v_x, v_y, 0)$ , после чего берется их векторное произведение  $M=(T,R)$ , которое и будет искомым моментом. Если полученный вектор  $M$  не является нулевым, то воздействующая сила приведет к повороту регулятора.

При выполнении всех условий поворота необходимо определить угол, на который должен повернуться регулятор. Рассмотрим момент времени  $T_0$  первого касания объекта воздействия и регулятора, а через  $T_1$  обозначим момент времени, в который впервые обнаружилось пересечение объекта воздействия и регулятора (ясно, что  $T_0 \leq T_1$ ). За время  $\Delta T = T_1 - T_0$  точка касания объекта перемещается внутрь регулятора на некоторое расстояние, и это расстояние будет самым большим среди расстояний, пройденных другими точками объекта внутри регулятора, а значит, именно ее перемещение определит нужный угол поворота. Пусть точка  $P_0$  является точкой касания объекта в момент времени  $T_0$ , а  $P_1$  - положение точки касания в момент  $T_1$ . В разработанной нами модели движения мы считаем, что угол поворота регулятора будет равен углу между плоскостями, проходящими через ось вращения регулятора и точки  $P_1$  и  $P_0$ , а сам поворот будет направлен от плоскости с точкой  $P_0$  к плоскости с точкой  $P_1$ .

## Заключение

Представленные технологии взаимодействия с элементами виртуальных пультов управления были реализованы в программных модулях и прошли успешное тестирование. В дальнейшем

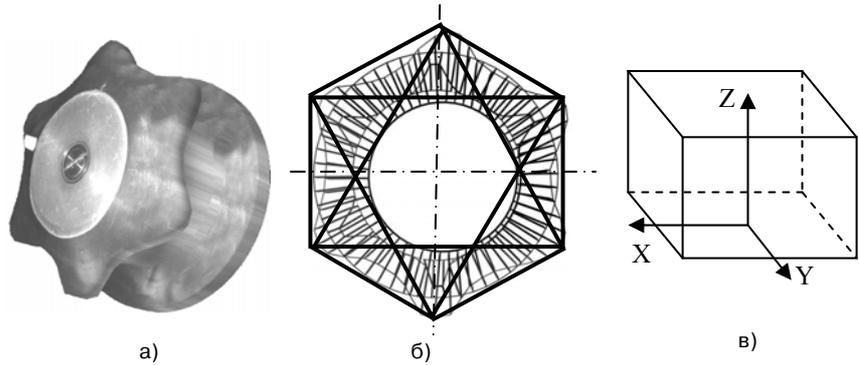


Рис. 11

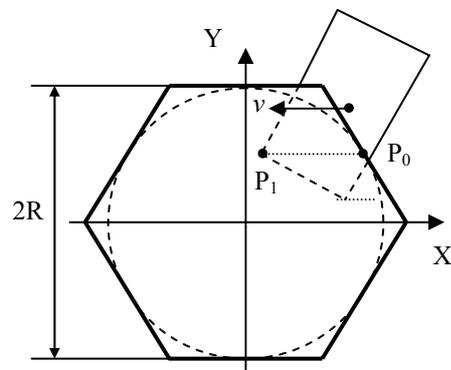


Рис. 12

разработанные программные модули будут внедрены в имитационный тренажерный комплекс для решения задач обучения управлению сложными процессами с использованием виртуального окружения.

## Литература

1. Михайлюк М.В., Решетников В.Н., Хураськин И.А. Технология взаимодействия человека с виртуальной средой. Программные продукты и системы, № 2, 2004, с. 16-19.
2. Devid H. Eberly. 3D Game Engine Design, Morgan-Kaufmann, 2002.
3. Devid H. Eberly. Game Physics, Morgan-Kaufmann, 2004.

**Хураськин Игорь Анатольевич.** Родился в 1981 году. Окончил Московский институт электронной техники. Имеет около 10 публикаций. Младший научный сотрудник Центра визуализации и спутниковых информационных технологий НИИСИ РАН (г. Москва).