

Санкт-Петербургский Государственный Университет

КРЫЛОВА Ольга Павловна

Выпускная квалификационная работа

***Моделирование процесса динамического позиционирования
морского судна с визуальной информацией в обратной связи***

Уровень образования: бакалавриат

Направление 02.03.02 «Фундаментальная информатика
и информационные технологии»

Основная образовательная программа СВ.5003.2017

«Программирование и информационные технологии»

Профиль «Автоматизация научных исследований»

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук,
профессор Сотникова М. В.

Рецензент:

заведующий кафедрой информационных систем,
доктор физ.-мат. наук,
профессор Олемской И.В.

Санкт-Петербург

2021

Оглавление

Введение.....	3
Обзор литературы.....	5
Постановка задачи.....	6
Глава 1. Математические модели судна и экранного изображения	7
1.1. Математическая модель судна.....	7
1.2. Математическая модель изображения	8
Глава 2. Управление процессом динамического позиционирования с использованием визуальной информации	13
2.1. Общая схема построения модели	13
2.2. Уравнения динамики судна	15
2.3. Уравнения динамики экранного изображения	16
2.4. Построение регулятора изображения	18
2.5. Построение регулятора судна.....	19
Глава 3. Имитационное моделирование в среде Simulink	21
3.1. Модель.....	21
3.2. Результаты	23
3.2.1. Регулятор изображения	25
3.2.3. Регулятор судна.....	26
3.2.3. Общая модель.....	28
Выводы	31
Заключение	32
Список использованной литературы.....	33
Приложение	34

Введение

Система динамического позиционирования (далее ДП) – это комплекс аппаратного и программного обеспечения, предназначенного для перевода морского судна в желаемое положение на горизонтальной плоскости и последующего удержания его в этом положении. При этом используются лишь судовые движители и средства активного управления, вследствие чего якоря или швартовые концы отходят на второй план. Также важно отметить, что в процессе ДП обязательно используется информация от каких-либо систем ориентации судна, которые могут работать на разных физических принципах. Как пример можно привести гидроакустические, радиоволновые, спутниковые, электромеханические, оптические и лазерно-оптические системы. Таким образом, систему ДП следует рассматривать как автоматический комплекс замкнутого цикла.

В данной работе рассматривается процесс математического моделирования ДП судна, где в качестве основного источника информации выступает изображение, получаемое с камеры, которая установлена на судне. С помощью этого изображения предполагается обеспечение некоторой траектории, по которой судно сможет подплыть на заданное расстояние к некоторому предмету, плавающему в море, и остановиться возле него. В качестве итога данной работы можно рассматривать результаты имитационного моделирования в среде Simulink, которые основаны на выведенных в ходе работы математических моделях. Также следует отметить, что в ходе исследования, с целью упрощения задачи, пренебрегаются внешние возмущения, действующие на судно и камеру.

Данная задача является достаточно актуальной в наши дни, так как большинство систем ДП в качестве источников внешней информации используют датчики, которые позволяют получать информацию в довольно маленьком радиусе относительно их положения. Если же в качестве

источника используется камера, то этот радиус становится заметно больше. При этом важно отметить, что для достоверной информации нужно довольно большое количество традиционных датчиков, поэтому использование камер, которых нужно значительно меньше, позволяет экономить ресурсы. Однако стоит отметить, что полностью избавиться от тех или иных датчиков не представляется возможным, так как камера находится исключительно над поверхностью судна и является более уязвимым устройством. Также сама задача ДП является важной проблемой современного судоходства, так как все больше судов используют системы ДП с целью разведки природных ресурсов в мировом океане.

Обзор литературы

Существует множество исследований, которые посвящены тем или иным аспектам рассматриваемой задачи. Так как в качестве объекта управления рассматривается полноприводное морское судно, а целью управления, в том числе, является обеспечение желаемого положения наблюдаемых точек объекта в плоскости изображения, получаемого с установленной на судне камеры, то данную задачу можно рассматривать как одну из вариаций задачи ДП, описанной в [1].

В [2] описана многоцелевая структура законов управления морскими подвижными объектами. Благодаря этой структуре возможно использовать оптимизационный подход для поиска коэффициентов базового закона управления с учетом ограничений на качество рассматриваемых динамических процессов.

На основе информации, которая поступает с камеры, необходимо формировать командный сигнал по угловой и линейным скоростям управляемого объекта. Этот процесс описан в [3] и он основывается на ошибке расхождения между действительным и желаемым положением наблюдаемых точек объекта в плоскости изображения.

Постановка задачи

Задачей данной работы является рассмотрение процесса динамического позиционирования судна с использованием информации, получаемой с изображения. Для этого на судне установлена камера, с которой поступают сигналы о положении заданных контролируемых точек.

В ходе работы необходимо построить математические модели динамики как судна, так и точек объекта на изображении, которое поступает с камеры. Также требуется построить регуляторы, которые будут отвечать за расчет целевых скоростей и формирование входного сигнала судна, на основе которого будет происходить перерасчет скоростей и положения судна.

Далее требуется провести имитационное моделирование в среде Simulink с целью наглядно проиллюстрировать работу полученных моделей, а также изучить динамику системы при различных начальных условиях и матрицах управления.

В качестве целей данной работы рассматриваются следующие пункты:

1. Рассмотреть параметры, которые влияют на процесс ДП судна;
2. Построить математическую модель судна;
3. Построить математическую модель изображения, получаемого с камеры;
4. Рассмотреть процесс ДП судна с использованием получаемой визуальной информации;
5. Провести моделирование рассматриваемого процесса в среде Simulink и дать оценку полученного результата.

Глава 1. Математические модели судна и экранного изображения

1.1. Математическая модель судна

Для записи уравнений динамики введем в рассмотрение две связанные системы координат (далее СК), которые традиционно используются при построении модели судна и изображения, формируемого видеокамерой на экране монитора. Первая из них, связанная с судном, обозначается $Ox_t y_t z_t$, а вторая, связанная с видеокамерой – $OXYZ$, причем центры обеих СК будем считать совпадающими и совмещенными с точкой фиксации камеры на судне (рисунок 1.1.1).

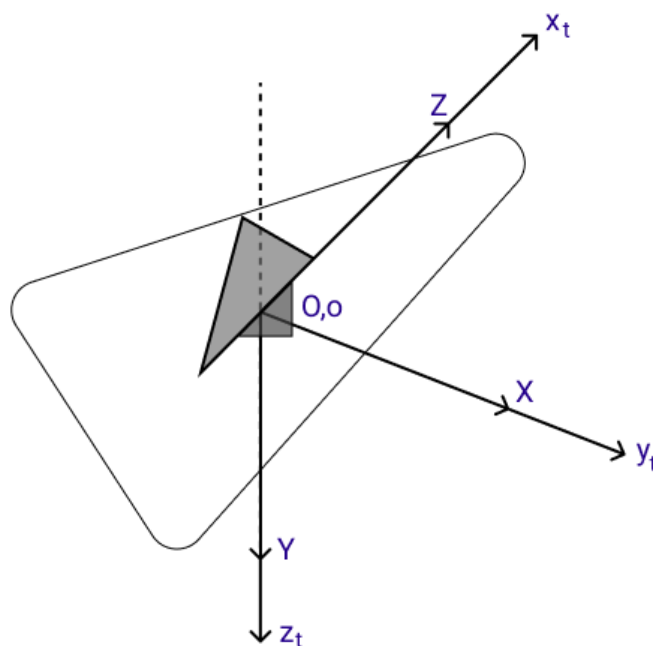


Рис. 1.1.1 – Системы координат

Уравнения динамики судна будем представлять в виде:

$$\begin{aligned} M\dot{v} &= -Dv + \tau + d(t), \\ \dot{\eta} &= R(\eta)v, \end{aligned} \tag{1.1.1}$$

где:

$\eta = (x \ y \ \psi)$ - вектор положения судна, причем x, y - координаты точки O (или o) в фиксированной земной системе координат O_Fxyz , а ψ – курсовой угол поворота относительно оси Oz_t ,

$v = (u \ v \ r)$ – вектор скоростей судна в проекциях на оси Ox_t, Oy_t, Oz_t соответственно,

$\tau = (P_x \ P_y \ Q_z)$ – вектор управляющих воздействий,

$d = (d_1 \ d_2 \ d_3)$ – вектор воздействий внешней среды в проекциях на оси связанной системы,

D – матрица линейного демпфирования, которая является положительно определенной,

M – матрица инерции, которая, также являясь положительно определенной, еще и симметрическая,

$R(\eta)$ – ортогональная матрица вращений, которая задается выражением:

$$R(\eta) = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

1.2. Математическая модель изображения

Динамика изображения описывается дифференциальными уравнениями относительно координат всех его контролируемых точек на экране монитора. Для записи этих уравнения рассмотрим одну точку P реального объекта с координатами X_P, Y_P, Z_P и соответствующую ей точку p изображения с экранными координатами x_p, y_p . Эти точки представлены в вертикальной плоскости на рисунке 1.2.1.

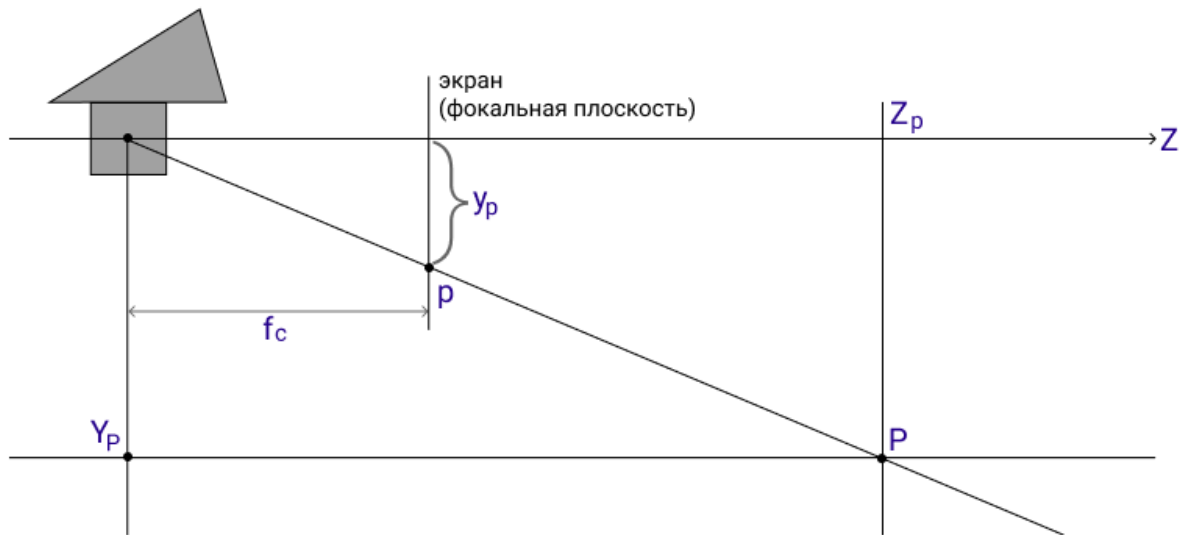


Рис. 1.2.1 – Точка P реального объекта и её изображение

Будем считать, что экран «удален» от камеры на ее фокусное расстояние f_c . Из подобия соответствующих треугольников имеем очевидное соотношение между координатами:

$$\frac{x_p}{X_p} = \frac{f_c}{Z_p},$$

$$\frac{y_p}{Y_p} = \frac{f_c}{Z_p},$$

причем второе из них записано аналогично для горизонтальной плоскости. Полагая $f_c = 1$, получим связь между координатами точки P реального объекта и её изображения p :

$$x_p = \frac{X_p}{Z_p},$$

$$y_p = \frac{Y_p}{Z_p},$$
(1.2.1)

Поскольку система координат движется с линейной скоростью $\mathbf{v} = (v_x \ v_y \ v_z)^T$ и вращается с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)$, то по законам механики имеем:

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_P \\ \dot{Y}_P \\ \dot{Z}_P \end{pmatrix} = -\mathbf{v} - \boldsymbol{\omega} \times \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} v_X \\ v_Y \\ v_Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \omega_Y Z_P - \omega_Z Y_P \\ \omega_X Z_P - \omega_Z X_P \\ \omega_X Y_P - \omega_Y X_P \end{pmatrix}.$$

Отсюда следуют равенства

$$\begin{cases} \dot{X}_P = -v_X - \omega_Y Z_P + \omega_Z Y_P, \\ \dot{Y}_P = -v_Y - \omega_X Z_P + \omega_Z X_P, \\ \dot{Z}_P = -v_Z - \omega_X Y_P + \omega_Y X_P, \end{cases} \quad (1.2.2)$$

определяющие скорости перемещения точки P реального объекта по отношению к камере.

Можно наблюдать связь между проекциями скоростей на оси систем $OXYZ$ и $ox_t y_t z_t$:

$$\begin{aligned} v_X = v, \quad v_Y = 0, \quad v_Z = u, \\ \omega_X = 0, \quad \omega_Y = r, \quad \omega_Z = 0. \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

Подставляя (1.2.3) в (1.2.2), получим:

$$\begin{cases} \dot{X}_P = -v - rZ_P, \\ \dot{Y}_P = 0, \\ \dot{Z}_P = -u + rX_P, \end{cases} \quad (1.2.4)$$

Далее обратимся к интересующим нас координатам x_p, y_p изображения p точки P на экране. Из геометрических соотношений (1.2.1) имеем:

$$\dot{x}_p = \frac{d}{dt} \left(\frac{X_P}{Z_P} \right) = \frac{\dot{X}_P}{Z_P} - \frac{X_P \dot{Z}_P}{Z_P^2} = \frac{\dot{X}_P - x_p \dot{Z}_P}{Z_P},$$

$$\dot{y}_p = \frac{d}{dt} \left(\frac{Y_P}{Z_P} \right) = \frac{\dot{Y}_P}{Z_P} - \frac{Y_P \dot{Z}_P}{Z_P^2} = \frac{\dot{Y}_P - y_p \dot{Z}_P}{Z_P},$$

что после подстановки (1.2.4) приводит к соотношениям:

$$\dot{x}_p = \frac{-v - rZ_P + x_p u - x_p r X_P}{Z_P} = -\frac{v}{Z_P} - r + \frac{x_p u}{Z_P} - x_p^2 r,$$

$$\dot{y}_p = -\frac{y_p(-u + rX_P)}{Z_P} = \frac{u y_p}{Z_P} - x_p y_p r,$$

или в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p/Z_P & -1/Z_P & -1 - x_p^2 \\ y_p/Z_P & 0 & -x_p y_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ r \end{pmatrix} \quad (1.2.5)$$

Совместно с третьим уравнением из системы (1.2.4), которое можно представить в виде

$$\dot{Z}_P = -u + r x_p Z_P. \quad (1.2.6)$$

По отношению к переменной Z_P («глубина» точки P относительно судна), уравнения (1.2.5) и (1.2.6) дают замкнутую систему нелинейных дифференциальных уравнений с тремя неизвестными функциями $x_p(t), y_p(t), Z_P(t)$.

Для задачи динамического позиционирования представление изображения только одной точкой ведет к определенному недоиспользованию возможностей управления. В связи с этим введем в рассмотрение векторы:

$$\xi_c = \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ x_a \end{pmatrix} \text{ и } Z_c = \begin{pmatrix} Z_P \\ Z_a \end{pmatrix},$$

где x_a – горизонтальная координата дополнительной точки a , являющейся изображением на экране дополнительной точки A реального объекта, глубина «сцены» для которой обозначена как Z_a .

С учетом дополнительных координат динамика изображения на экране определяется уравнениями:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{x}_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_p/Z_P & -1/Z_P & -1 - x_p^2 \\ y_p/Z_P & 0 & -x_p y_p \\ x_a/Z_a & -1/Z_a & -1 - x_a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ r \end{pmatrix}, \quad (1.2.7)$$

Вводя в рассмотрение матрицу

$$L_z(\xi_c, Z_c) \triangleq \begin{pmatrix} x_p/Z_P & -1/Z_P & -1 - x_p^2 \\ y_p/Z_P & 0 & -x_p y_p \\ x_a/Z_a & -1/Z_a & -1 - x_a^2 \end{pmatrix}, \quad (1.2.8)$$

уравнение (1.2.7) можно записать в виде

$$\dot{\xi}_c = L_z(\xi_c, Z_c)\nu, \quad (1.2.9)$$

которое, совместно с уравнениями (1.2.8), однозначно определяет динамику изображения объекта на экране.

Глава 2. Управление процессом динамического позиционирования с использованием визуальной информации

2.1. Общая схема построения модели

В предшествующем параграфе представлены математические модели (1.1.1) судна и (1.2.6), (1.2.9) динамики изображения на экране монитора. Рассматриваемые совместно, соответствующие уравнения образуют систему, которую можно представить как математическую модель объекта управления в задаче динамического позиционирования с визуальной информацией. Эти уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} M\dot{\mathbf{v}} &= -D\mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}(t), \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} &= R(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v}, \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\xi}}_c &= L_z(\boldsymbol{\xi}_c, \mathbf{Z}_c)\mathbf{v} + \mathbf{d}_c(t), \\ \dot{\mathbf{Z}}_c &= L_z(\boldsymbol{\xi}_c, \mathbf{Z}_c)\mathbf{v}, \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

где \mathbf{d}_c – вектор возмущений, действующих на камеру. Объект управления с входами $\mathbf{d}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{d}_c$ и измеряемыми выходами $\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\xi}_c, \mathbf{Z}_c$ графически представлен на рисунке 2.1.1.

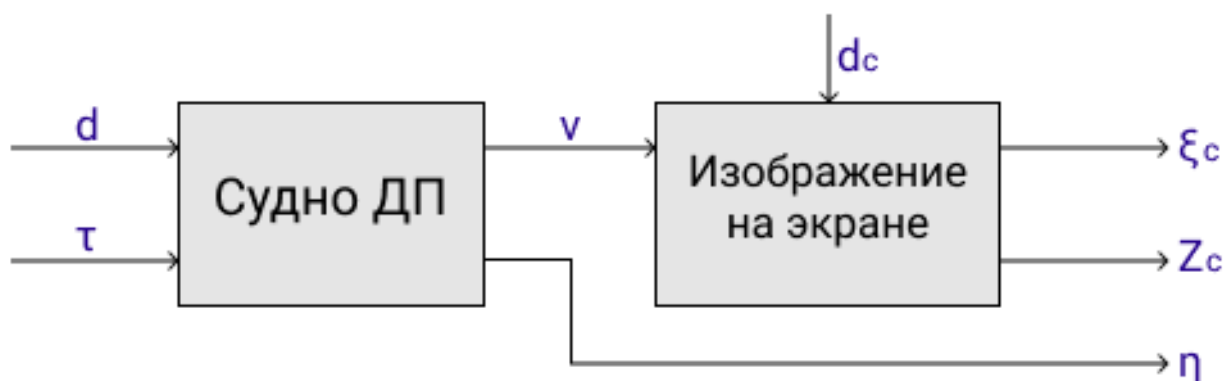


Рис. 2.1.1. – Объект управления в задаче визуального ДП

Существо задачи ДП с использованием визуальной информации состоит в синтезе нелинейной обратной связи вида

$$\begin{aligned}\dot{\rho} &= f(\rho, \tau, \eta, \xi_c, Z_c, \xi_d), \\ \tau &= g(\rho, \eta, \xi_c, Z_c, \xi_d),\end{aligned}\tag{2.1.3}$$

где ρ – вектор состояния регулятора, а $\xi_d \in E^3$ – вектор координат желаемого положения изображения на экране. Входом регулятора (2.1.3) служит измеряемый выход объекта (2.1.1), (2.1.2), представленный векторами η, ξ_c, Z_c .

Целью синтеза регулятора (2.1.3) является обеспечение желаемого положения равновесия ξ_d по вектору ξ_c при отсутствии внешних возмущений d и d_c :

$$\xi_{c0} = \lim_{t \rightarrow \infty} \xi_c(t) = \xi_d,\tag{2.1.4}$$

а также асимптотическую устойчивость по Ляпунову этого положения.

Следует отметить, что решение поставленной задачи в общем виде (путем прямого поиска функций f и g в уравнениях обратной связи (2.1.3)) представляется исключительно сложной задачей. В связи с этим рассмотрим следующий упрощенный подход к синтезу обратной связи, который определяется двумя этапами. Вначале, принимая скорость v судна в качестве управляющего воздействия для изображения, синтезируем локальную обратную связь

$$v = v_d = v_d(\xi_c, Z_c, \xi_d),$$

для системы (2.1.2), обеспечивая выполнение условие (2.1.4).

Далее, считая известной скорость v_d в каждый момент времени, сформируем закон управления судном в виде

$$\tau = \tau_d = \tau_d(v, v_d),\tag{2.1.5}$$

обеспечивая положение равновесия $v = v_d$ и его глобальную асимптотическую устойчивость [4] для замкнутой системы (2.1.1), (2.1.5).

Блок-схема замкнутой системы управления, формируемой в рамках данного подхода, представлена на рисунке 2.1.2.

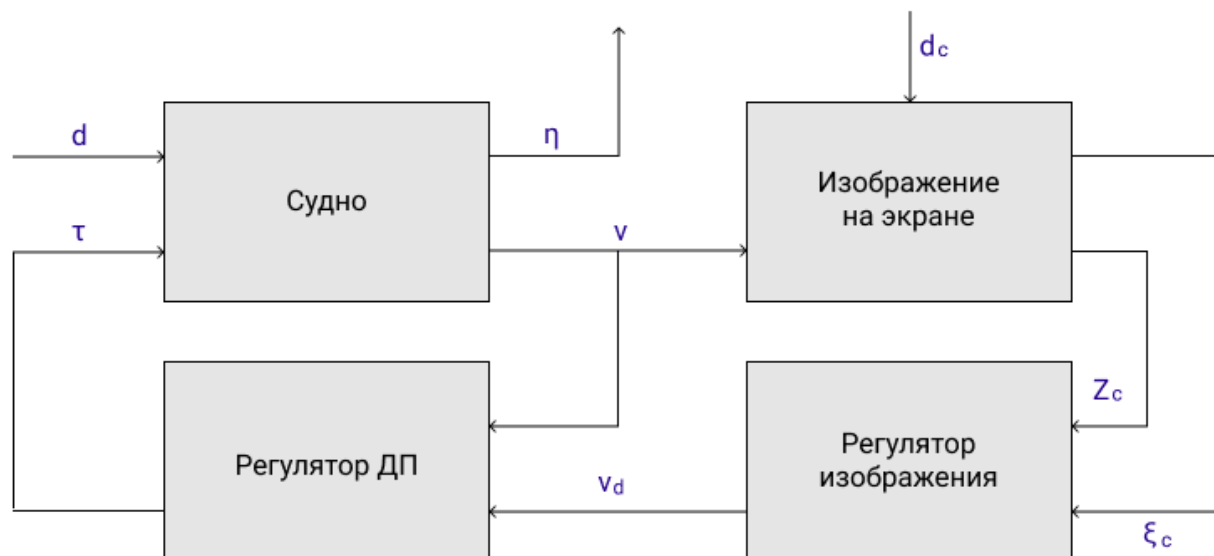


Рис. 2.1.2. – Блок-схема замкнутой системы ДП с визуальной информацией в контуре обратной связи

Замечание: строго говоря, переменная Z_c , характеризующая глубину сцены, не относится к блоку изображения, её компоненты могут быть либо измерены с помощью лазерного дальномера, либо восстановлены с использованием асимптотического наблюдателя.

2.2. Уравнения динамики судна

Обратимся еще раз к уравнениям (2.1.1):

$$M\dot{v} = -Dv + \tau + d(t),$$

$$\dot{\eta} = R(\eta),$$

Примем во внимание:

$$d = R^{-1}(\eta)\tau_e.$$

Для записи этих уравнений в скалярной форме полагается:

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}^{-1} = \begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix}.$$

С учетом всех обозначений, уравнения (2.1.1) примут вид:

$$\dot{\mathbf{v}} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}\mathbf{v} + \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}),$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v},$$

что приводится к скалярной форме:

$$\dot{v}_x = -d_{11}v_x + m_{11}P_x + m_{11}(\cos\psi F_x + \sin\psi F_y),$$

$$\dot{v}_y = -d_{22}v_y + d_{23}w_z + m_{22}P_y + m_{22}(-\sin\psi F_x + \cos\psi F_y),$$

$$\dot{v}_z = -d_{32}v_y + d_{33}w_z + m_{33}Q_z + m_{33}M_z,$$

$$\dot{x} = v_x \cos\psi - v_y \sin\psi,$$

$$\dot{y} = v_x \sin\psi + v_y \cos\psi,$$

$$\dot{\psi} = w_z.$$

2.3. Уравнения динамики экранного изображения

Пусть имеется реальная точка $\mathbf{P} = (X_p \ Y_p \ Z_p)$ в пространстве и еще одна вспомогательная точка $\mathbf{A} = (X_a \ Y_a \ Z_a)$, эти точки лежат на некотором предмете, плавающем в море. Нас особо интересует экранный образ $\mathbf{p} = (x_p \ y_p)$ точки \mathbf{P} и координата x_a экранного образа точки \mathbf{A} . Поскольку видеокамера установлена на движущемся со скоростью $\mathbf{v} = (v \ u \ r)$ судне, при неподвижной точке \mathbf{P} её образ \mathbf{p} будет двигаться по экрану. Это экранное движение описывается уравнениями:

$$\dot{x}_p = \frac{x_p u - v - (1 + x_p^2)r Z_p}{Z_p} + d_1,$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_p &= \frac{y_p u - x_p y_p r Z_p}{Z_p} + d_2, \\ \dot{x}_a &= \frac{x_a u - v - (1 + x_a^2) r Z_a}{Z_a} + d_3, \\ \dot{Z}_p &= -u + r x_p Z_p, \\ \dot{Z}_a &= -u + r x_a Z_a, \end{aligned}$$

где d_1, d_2, d_3 – внешние возмущения, действующие на камеру (вибрации, шумы в приводе и так далее).

Ранее уже были выведены уравнения связи между координатами реальной точки и точка на экране:

$$\frac{x_p}{X_p} = \frac{f_c}{Z_p}, \quad \frac{y_p}{Y_p} = \frac{f_c}{Z_p},$$

где f_c – фокусное расстояние камеры. Отсюда имеем:

$$\begin{aligned} X_p f_c &= x_p Z_p, \\ Y_p f_c &= y_p Z_p. \end{aligned}$$

Далее определим следующую последовательность действий, чтобы произвести расчет конечного положения точки на экране:

1. Задание расстояния Z_{p0} до объекта (измеряется дальномером), а также фокусного расстояния f_c камеры.
2. Определение вертикального расстояния Y_p (примерно равного высоте установки камеры от поверхности воды).
3. Задание бокового сдвига объекта X_p .
4. Расчет координат начального положения точки на экране:

$$x_{p0} = \frac{X_p f_c}{Z_{p0}}, \quad y_{p0} = \frac{Y_p f_c}{Z_{p0}}.$$

5. Задание желаемого конечного расстояния Z_{pd} до объекта.
6. Расчет координат конечного положения точки на экране:

$$x_{pd} = \frac{X_p f_c}{Z_{pd}}, \quad y_{pd} = \frac{Y_p f_c}{Z_{pd}}.$$

2.4. Построение регулятора изображения

На этом этапе нужно сформировать обратную связь, используя визуальную информацию о положении точки p на экране. Для этого необходимо построить базовый регулятор изображения, который в некоторой степени (довольно грубой) имитирует судно. При этом само судно на данном этапе не используется. Искомый регулятор отвечает за формирование скорости v_d , которая в дальнейшем будет подаваться на отработку системе управления судна. Таким образом, v_d – это желаемая трехмерная скорость перемещения камеры. Для этого будем использовать следующий алгоритм действий:

1. Рассматриваются уравнения динамики изображения

$$\dot{\xi}_c = L(\xi_c, Z_c)v,$$

$$\dot{Z}_c = L_Z(\xi_c, Z_c)v,$$

и начальные условия (по точке p):

$$\xi_c(0) = (x_{p0}, y_{p0}, x_{a0})^T,$$

$$Z_c(0) = (Z_{p0}, Z_{a0})^T.$$

2. Необходимо переместить точку p в заданное положение

$$\xi_{cd} = (x_{pd}, y_{pd}, x_{ad})^T.$$

Для этого вводится новая переменная $e(t)$ – ошибка по положению точки p :

$$e(t) := \xi_c(t) - \xi_{cd} \rightarrow \dot{e} = \dot{\xi}_c(t),$$

тогда уравнение ошибки имеет вид:

$$\dot{e} = L(\xi_c, Z_c)v.$$

3. Вводится новое управление

$$\mathbf{v} := L(\xi_c, \mathbf{Z}_c)\mathbf{v} \Leftrightarrow \mathbf{v} = L^{-1}(\xi_c, \mathbf{Z}_c)\mathbf{v},$$

которое приводит уравнение ошибки к виду

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{v}. \quad (2.4.1)$$

4. Для системы (2.4.1) строится регулятор:

$$\mathbf{v} = \mathbf{K}\mathbf{e}, \quad \mathbf{K} = \text{diag}\{k_1, k_2, k_3\},$$

причем $k_i > 0$ – условие устойчивости.

5. Получается исходное управление:

$$\mathbf{v}_d = L^{-1}(\xi_c, \mathbf{Z}_c)\mathbf{K} \cdot \mathbf{e} \equiv L^{-1}(\xi_c, \mathbf{Z}_c)\mathbf{K}(\xi_c - \xi_{cd}).$$

2.5. Построение регулятора судна

Обратимся еще раз к первому уравнению из (2.1.1):

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} = -\mathbf{D}\mathbf{v} + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}(t), \quad (2.5.1)$$

Нелинейный закон управления «по состоянию» имеет вид [5]:

$$\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{K}_d(\mathbf{v} - \mathbf{K}_v\mathbf{v}_d), \quad (2.5.2)$$

Исходные скорости \mathbf{v}_d уже были найдены в предыдущем пункте, на основе них требуется найти управляющий сигнал, который и будет подаваться на отработку системе управления судна. Подставляя (2.5.2) в (2.5.1), получаем:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} = -\mathbf{D}\mathbf{v} - \mathbf{K}_d(\mathbf{v} - \mathbf{K}_v\mathbf{v}_d) + \mathbf{d}(t), \quad (2.5.3)$$

При отсутствии внешних возмущений, система (2.5.3) имеет положение равновесия $\mathbf{v} = \mathbf{v}_d$, отсюда получаем:

$$-\mathbf{D}\mathbf{v} - \mathbf{K}_d(\mathbf{v} - \mathbf{K}_v\mathbf{v}) = \mathbf{0},$$

$$-\mathbf{D} - \mathbf{K}_d + \mathbf{K}_d\mathbf{K}_v = \mathbf{0},$$

$$\mathbf{K}_v = \mathbf{K}_d^{-1}(\mathbf{D} + \mathbf{K}_d).$$

Причем для глобальной асимптотической устойчивости этого положения достаточно, чтобы матрица \mathbf{K}_d была диагональной и положительно определенной. Таким образом:

$$\boldsymbol{\tau} = -\mathbf{K}_d(\boldsymbol{v} - \mathbf{K}_d^{-1}(\mathbf{D} + \mathbf{K}_d)\boldsymbol{v}_d).$$

Глава 3. Имитационное моделирование в среде Simulink

3.1. Модель

Полученная модель приведена на рисунке 3.1.1. Код, который инициализирует параметры модели и вычисляет правые части полученных в ходе исследования уравнений, приведен в приложении. В данной модели следует обратить внимание на следующие блоки:

1. Блок **Ship** отвечает за позиционирование судна, его схема приведена на рисунке 3.1.2, а главная функция в листинге 2.
2. Блок **Image** отвечает за экранный образ точки p , его схема приведена на рисунке 3.1.3, а главная функция в листинге 3.
3. Блок **Image controller** отвечает за формирование новой скорости судна на основе информации, получаемой с изображения. На вход подаются текущие координаты точки и желаемое конечное положение, на основе чего функция, приведенная в листинге 4, вычисляет скорость.
4. Блок **Direct** отвечает за регулирование скорости, которая является выходом предыдущего блока. В результате получается скорость, которая не выходит за рамки заданных пределов.
5. Блок **Ship controller** отвечает за расчет нового управления τ , которое подается судну на вход. Функция, отвечающая за расчет, приведена в листинге 5.
6. Блок **Disturb** отвечает за возмущения, которые действуют на камеру. На данном этапе будем считать, что возмущений нет.

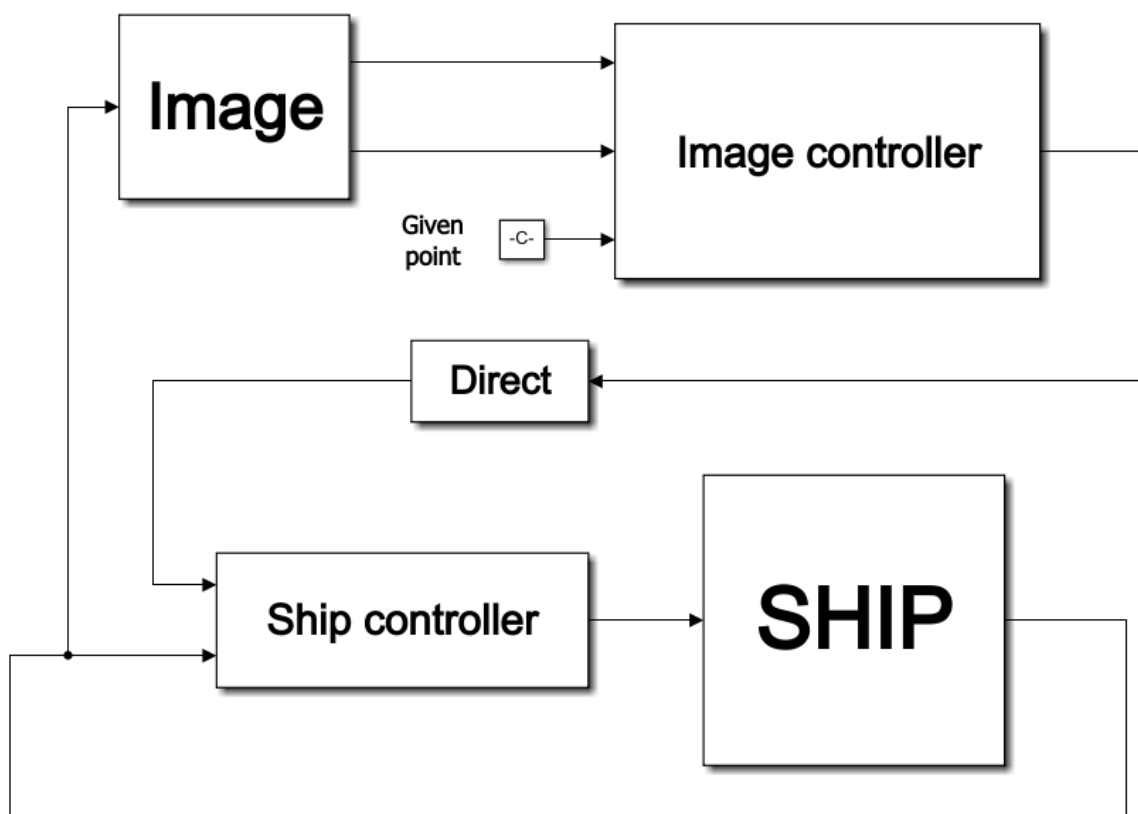


Рис. 3.1.1 – Полученная модель

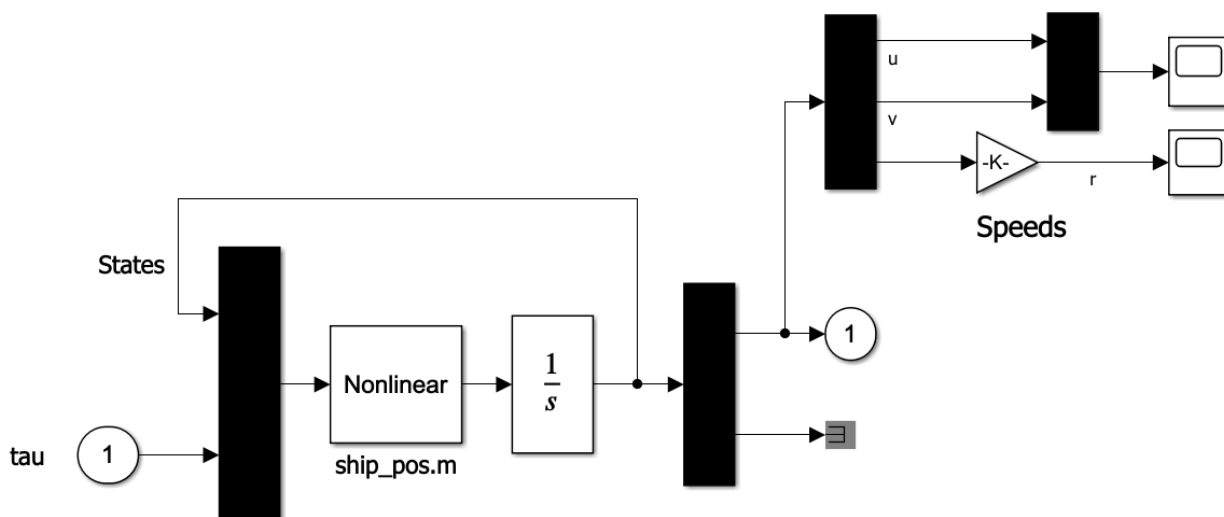


Рис. 3.1.2 – Схема блока Ship

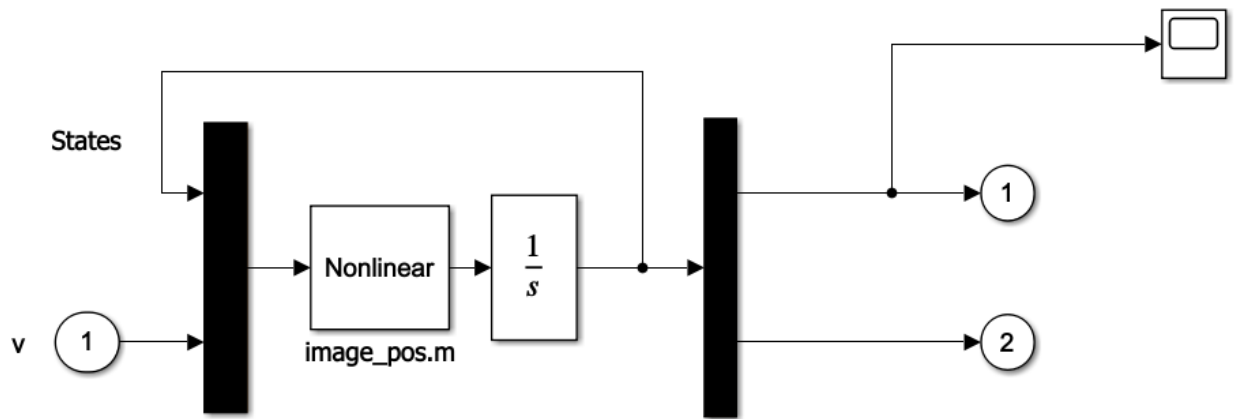


Рис. 3.1.3 – Схема блока Image

3.2. Результаты

Рассмотрим пример имитационного моделирования. В качестве объекта управления примем морское судно "Northern Clipper", модель которого описана в [6], длиной $L = 76.2$ м и массой $m = 4.59 \cdot 10^6$ кг. При этом матрицы инерции и линейного демпфирования имеют следующие компоненты:

$$M = \begin{pmatrix} 5.31 \cdot 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 8.28 \cdot 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 3.75 \cdot 10^6 \end{pmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} 5.02 \cdot 10^4 & 0 & 0 \\ 0 & 2.72 \cdot 10^5 & -4.39 \cdot 10^6 \\ 0 & -4.39 \cdot 10^6 & 4.19 \cdot 10^8 \end{pmatrix}.$$

Матрицы K_{im} регулятора изображения и K_{ship} регулятора судна выглядят следующим образом:

$$K_{im} = 0.0015 \cdot E_{3 \times 3},$$

$$K_{ship} = \begin{pmatrix} 10^6 & 0 & 0 \\ 0 & 10^6 & 0 \\ 0 & 0 & 10^3 \end{pmatrix},$$

где $E_{3 \times 3}$ – единичная матрица.

Рассмотрим результаты моделирования для следующих параметров (в метрах):

$f_c = 1$ – фокусное расстояние камеры,

$Z_{p0} = 300$ – расстояние до объекта,

$Y_p = 4.5$ – вертикальное расстояние до объекта

$X_p = 15$ – боковой сдвиг объекта,

$Z_{pd} = 10$ – конечное расстояние до объекта.

Исходя из этого, получаем координаты начальной и конечной точек на экране:

$$X_{p0} = \frac{X_p \cdot f_c}{Z_{p0}} = 0.05, \quad Y_{p0} = \frac{Y_p \cdot f_c}{Z_{p0}} = 0.015,$$

$$X_{pd} = \frac{X_p \cdot f_c}{Z_{pd}} = 1.5, \quad Y_{pd} = \frac{Y_p \cdot f_c}{Z_{pd}} = 0.45.$$

Координатами дополнительной точки будем считать:

$$X_{a0} = 1.1 \cdot X_{p0}, \quad Y_{a0} = Y_{p0},$$

$$X_{ad} = 1.1 \cdot X_{pd}, \quad Y_{ad} = Y_{pd}.$$

Начальные условия для судна:

$$v = (0 \ 0 \ 0),$$

$$\eta = (0 \ 0 \ 0).$$

3.2.1. Регулятор изображения

Первым делом следует проверить корректность работы регулятора изображения отдельно от судна (рисунок 3.2.1). Результаты, полученные для заданных параметров, приведены на рисунках 3.2.2-3.2.4. Точки корректно достигают своей цели, скорости сходятся к нулю.

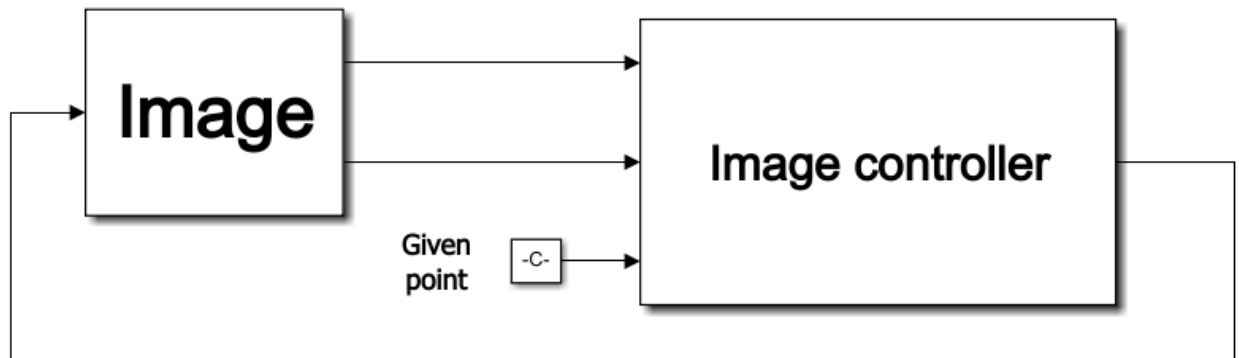


Рисунок 3.2.1 – Модель для изображения

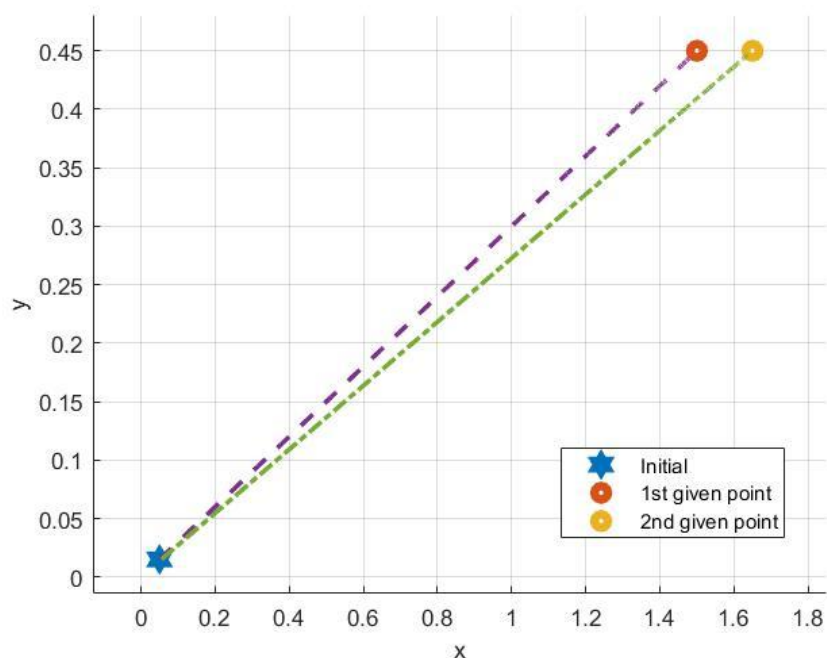


Рисунок 3.2.2 – Перемещение точек на экране

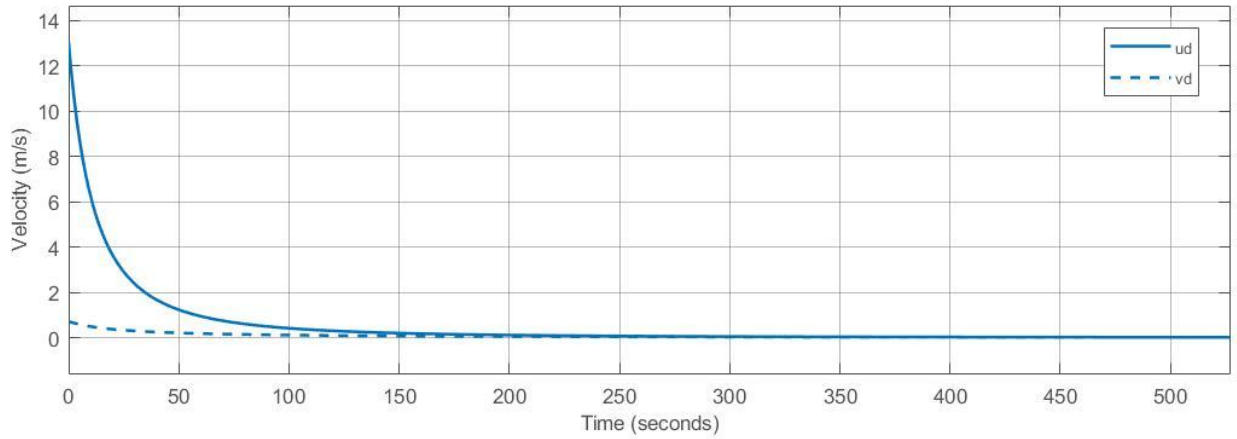


Рисунок 3.2.3 – Изменение линейных целевых скоростей

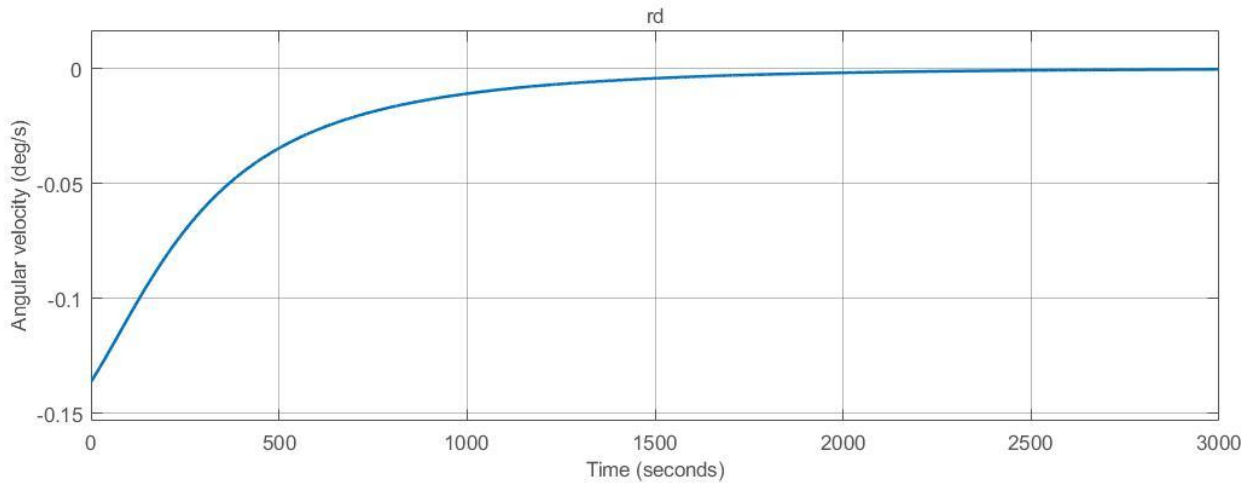


Рисунок 3.2.4 – Изменение угловой целевой скорости

3.2.3. Регулятор судна

Далее следует проверить корректность работы регулятора судна (рисунок 3.2.5). Для этого в качестве целевой скорости выберем константное значение $\mathbf{v}_d = (5 \ 2 \ 0.1)$. Графики изменения скоростей судна представлены на рисунках 3.2.6 и 3.2.7 соответственно.

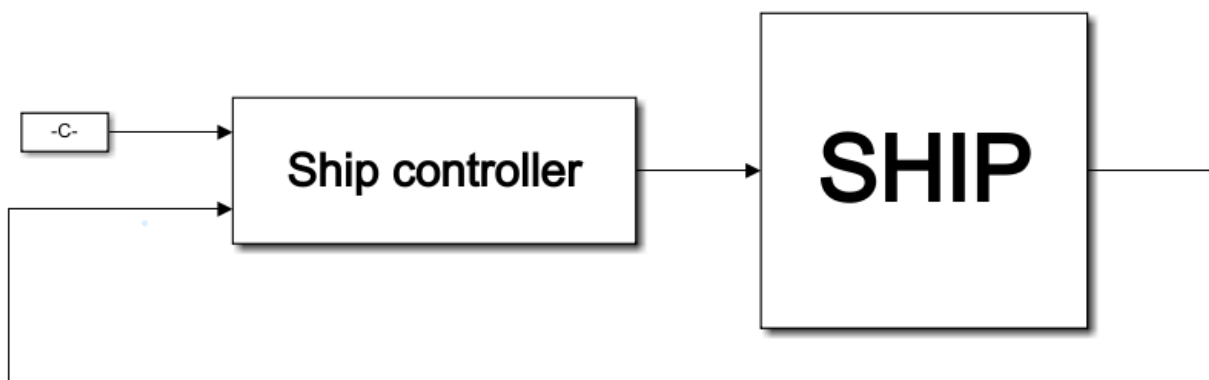


Рисунок 3.2.5 – Модель для судна

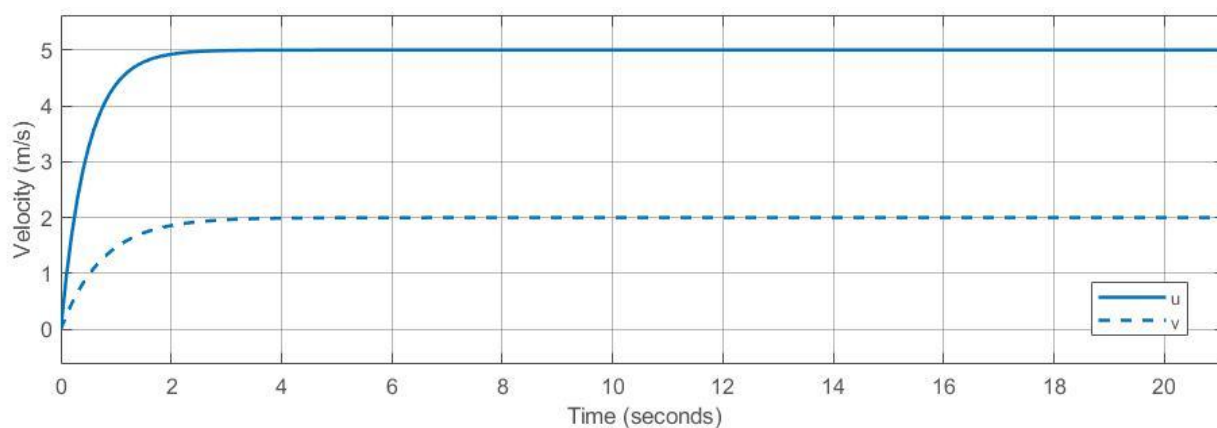


Рисунок 3.2.6 – Изменение линейных скоростей судна

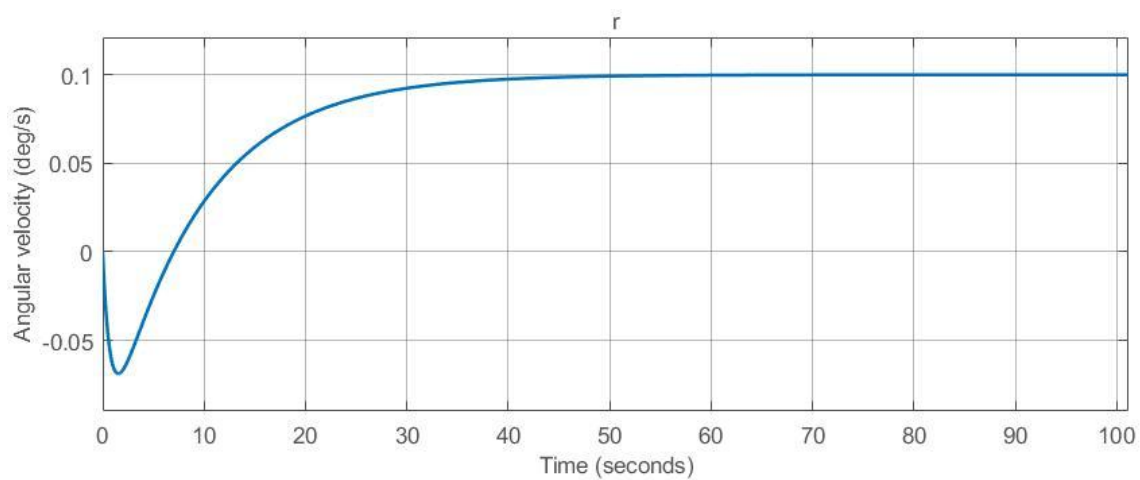


Рисунок 3.2.7 – Изменение угловой скорости судна

3.2.3. Общая модель

В качестве результата можно рассматривать график перемещения точек на экране в вычисленную позицию (рисунок 3.2.8) и график перемещения судна (рисунок 3.2.9). Также следует обратить внимание на графики, иллюстрирующие целевые и фактические скорости судна (рисунки 3.2.10 - 3.2.12) чтобы показать, что при приближении к объекту скорость судна уменьшается и в итоге оно останавливается на требуемом расстоянии. Также можно заметить, что судно корректно обрабатывает входящие скорости. При этом передвижение происходит достаточно быстро, большую часть времени занимает разворот судна в нужное положение. Графики изменения вектора управляющих воздействий судна также представлены на рисунках 3.2.13 и 3.2.14.

С учетом габаритов судна и требуемого конечного расстояния, получается вполне удовлетворительный результат, судно достигает заданное положение, а точка на экране приближается к рассчитанным координатам.

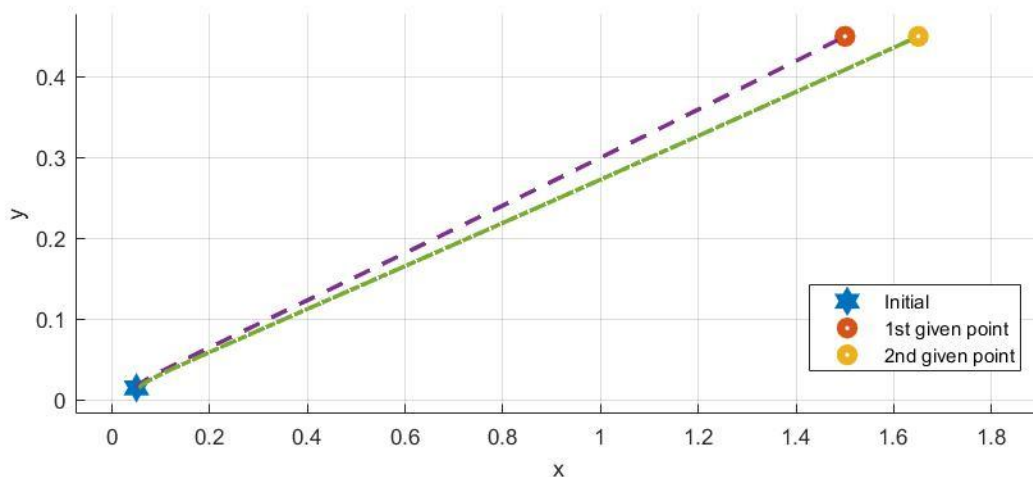


Рис. 3.2.8 – Перемещение точек на экране

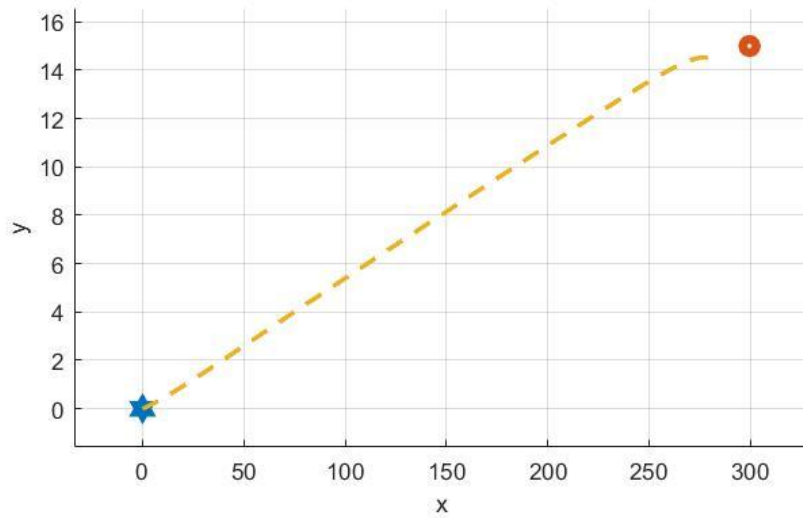


Рис. 3.2.9 – Перемещение судна

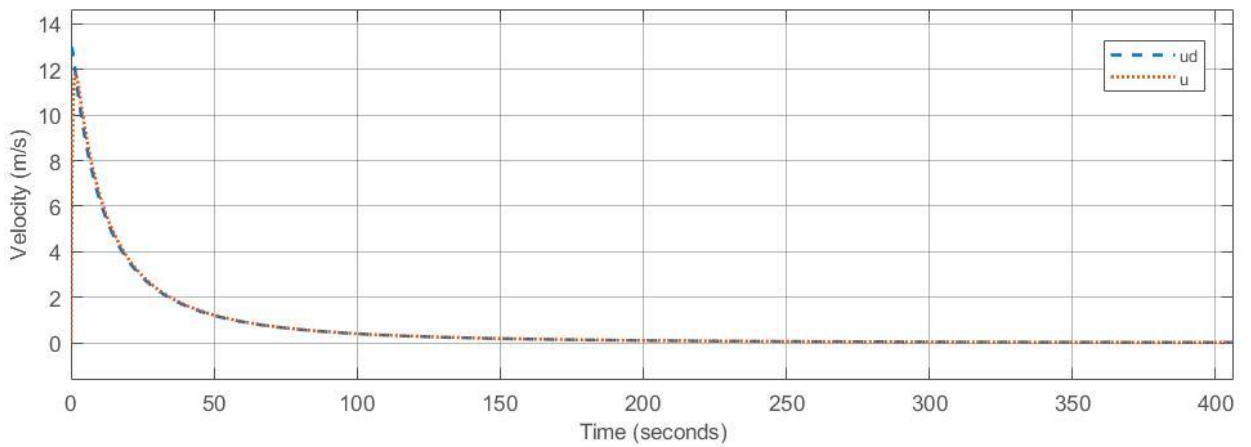


Рис. 3.2.10 – Изменение u_d и u

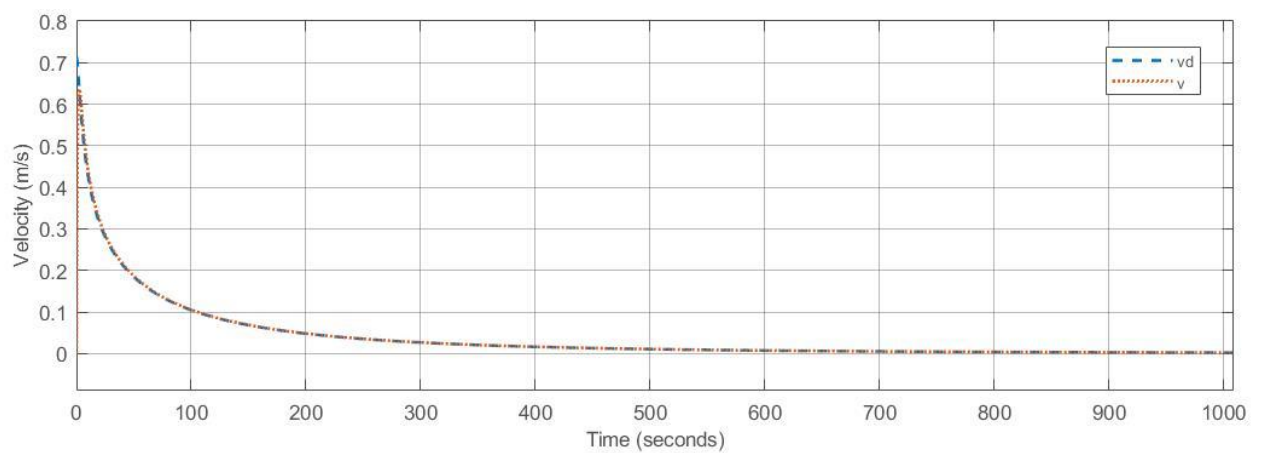


Рис. 3.2.11 – Изменение v_d и v

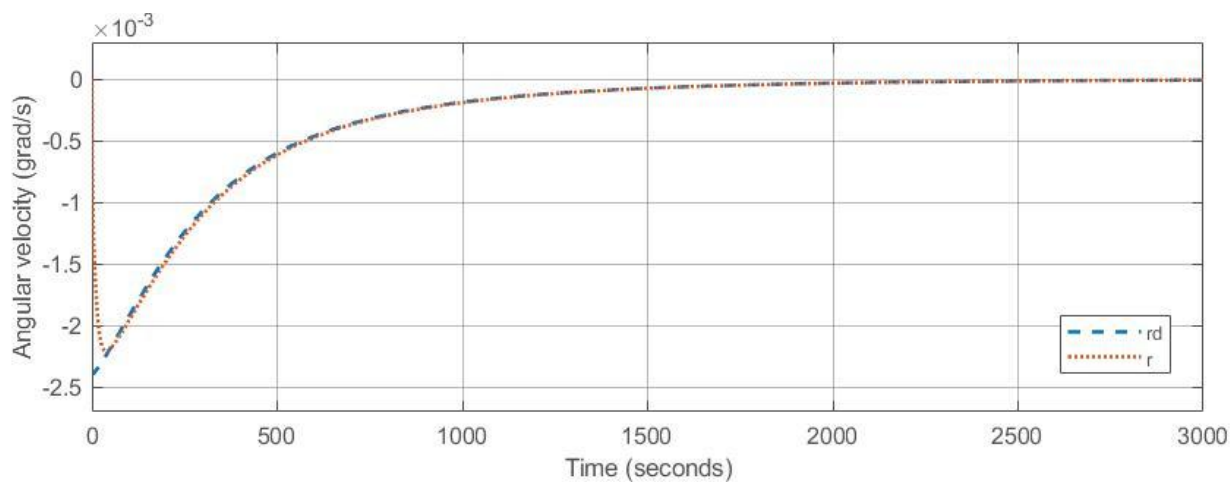


Рис. 3.2.12 – Изменение r_d и r

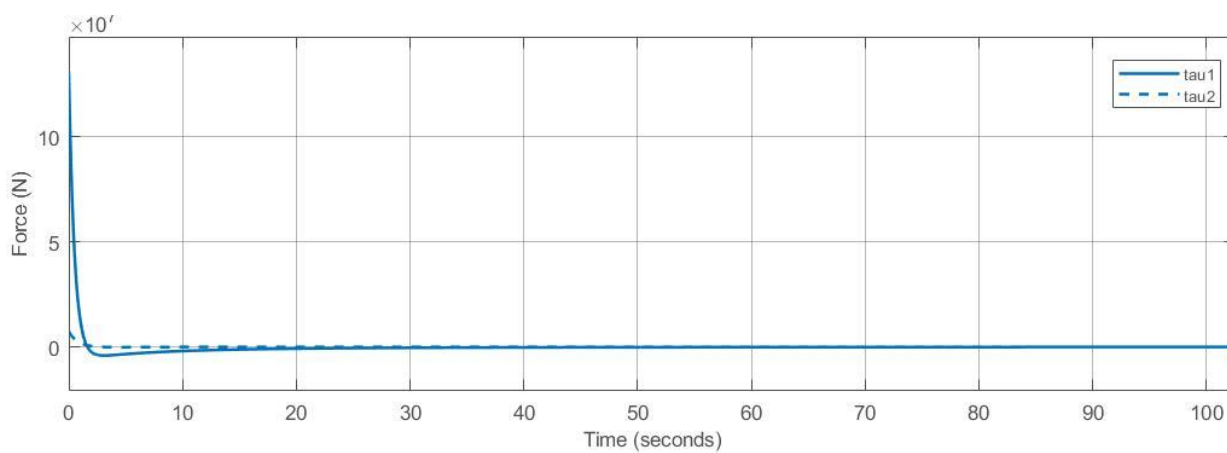


Рис. 3.2.13 – Изменение вектора управляющих воздействий

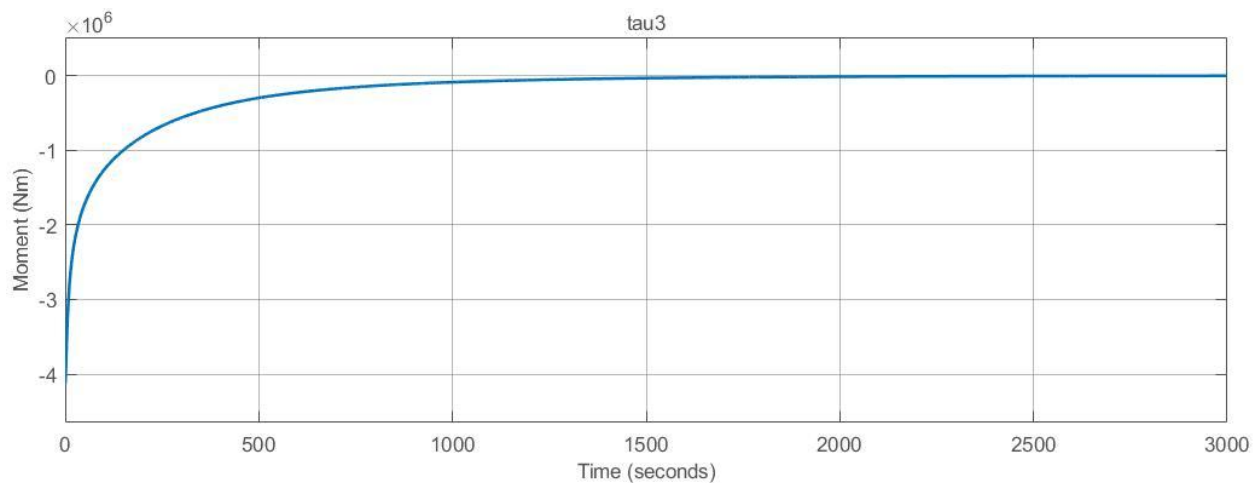


Рис. 3.2.14 – Изменение вектора управляющих воздействий

Выводы

В ходе данной работы были построены математические модели для судна и объекта на изображении. Они включают себя как позиционирование судна и контролируемых точек объекта, так и регуляторы, благодаря которым обеспечивается расчет целевых скоростей судна и вектора управляющих воздействий.

Затем было проведено моделирование полученных моделей в среде Simulink. Были проведены эксперименты как над отдельными блоками, так и над всей системой в совокупности. В ходе экспериментов были найдены матрицы управления для регуляторов изображения и судна, при которых обеспечивается необходимая динамика всей системы.

При этом стоит заметить, что по отдельности блоки изображения и судна корректно обрабатывают при любых положительно определенных матрицах управления, а для обеспечения корректной работы всей системы необходимо учесть динамику отдельных блоков при различных матрицах и подобрать их таким образом, чтобы система работала стабильно.

Заключение

В ходе работы был рассмотрен процесс моделирования динамического позиционирования судна с использованием камеры, установленной на судне. Полученная система соответствует условиям поставленной задачи. Результаты получились вполне удовлетворительные. Таким образом, можно сделать вывод, что благодаря камере действительно можно контролировать процессы перемещения судна и достижения судном заданной цели.

Следует отметить, что данной работе не учитывались внешние возмущения, действующие как на судно, как так и на камеру, так как это в некоторой степени усложняет процесс стабилизации изображения. Этот аспект можно рассмотреть в отдельных исследованиях.

Список использованной литературы

1. Margarita V. Sotnikova, Evgeny I. Veremey. Dynamic Positioning Based on Nonlinear MPC // Proceedings of the 9th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS 2013). Osaka, Japan, September 17-20, 2013. – P. 37-42.
2. Веремей Е.И., Сотникова М.В. Многоцелевая структура законов управления морскими подвижными объектами // Труды: XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014), Москва, 16-19 июня, 2014. [Электронный ресурс] М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 3289-3300.
3. Chaumette F., Hutchinson S. Visual Servo Control: Basic Approaches // IEEE Robotics & Automation Magazine. 2006. Vol. 13, No. 4, pp. 82-90.
4. Матросов, В. М. Теория устойчивости многокомпонентных нелинейных систем: учебное пособие / В. М. Матросов, Р. И. Козлов, Н. И. Матросова. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
5. Веремей, Е. И. Многоцелевой закон управления подвижным объектом с использованием визуальной информации в контуре обратной связи / Е. И. Веремей, М. В. Сотникова // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2014. №10.
6. Fossen, T. I. and J. P. Strand. Passive Nonlinear Observer Design for Ships Using Lyapunov Methods: Experimental Results with a Supply Vessel // Automatica, 1999. Vol. (35), No. (1), pp. 3-16.

Приложение

В этом разделе приведены листинги с исходными кодами программ, которые были использованы в данной работе.

В листинге 1 приведен код, который инициализирует параметры модели.

Листинг 1

```
clear all;

global m L m11 m22 m33 d11 d22 d33 d23 d32;
global D d;
global im_xps im_yps im_xas;
global ship_xs ship_ys;

% Ship parameters
m = 4.591e6;           % weight (kg)
L = 76.2;             % length (m)

% Inertion matrix and parameters
M = diag([5.3122e6 8.2831e6 3.7454e9]);
M1 = inv(M);
m11 = M1(1,1); m22=M1(2,2); m33=M1(3,3);

% Damping matrix and parameters
D = [5.0242e4      0      0;
      0      2.7229e5 -4.3933e6;
      0      -4.3933e6 4.1894e8];
D1 = M1 * D;

d11=D1(1,1);
d22=D1(2,2); d23=D1(2,3);
d32=D1(3,2); d33=D1(3,3);

% Input effects on the ship
d = [0 0 0];

% Object and camera start parameters
% 1. Distance
zp0 = 300;
% 2. Vertical distance to the object
Yp = 4.5;
% 3. Focus distance to camera
fc = 1.0;
% 4. Side shift of the object
```

```

Xp = 15;
% 5. Coordinates of start point p on the image
yp0 = (Yp * fc) / zp0; xp0 = (Xp * fc) / zp0;
% 6. Final distance to the object
zpd = 10;
% 7. Coordinates of the end point p on the image
xpd = (Xp * fc) / zpd;
ypd = (Yp * fc) / zpd;

im_xps = [];
im_yps = [];
im_xas = [];

ship_xs = [];
ship_ys = [];

sim('posi_vizual')

figure(1);
hold on;
grid on;
plot(xp0, yp0, 'h', 'LineWidth', 4);
plot(xpd, ypd, 'o', 'LineWidth', 4);
plot(xpd * 1.1, ypd, 'o', 'LineWidth', 4);
plot(im_xps, im_yps, '--', 'LineWidth', 2);
plot(im_xas, im_yps, '-.', 'LineWidth', 2);
legend("Initial", "1st given point", "2nd given point");
xlabel("x");
ylabel("y");

y0 = Xp;
x0 = sqrt(zp0 * zp0 - Xp * Xp);
figure(2);
hold on;
grid on;
plot(0, 0, 'h', 'LineWidth', 4);
plot(x0, y0, 'o', 'LineWidth', 4);
plot(ship_xs, ship_ys, '--', 'LineWidth', 2);
xlabel("x");
ylabel("y");

```

В листинге 2 приведен код функции, которая вычисляет правые части уравнений динамики судна.

Листинг 2

```

function z=ship_pos(u)
    global m11 m22 m33 d11 d22 d33 d23 d32 d;
    global ship_xs ship_ys;

```

```

% General parameters
z=zeros(6,1);

% Input parameters
Vx = u(1); Vy = u(2); Wz = u(3);
x = u(4); y = u(5); phi = u(6);
Px = u(7); Py = u(8); Qz = u(9);

Fx = d(1); Fy = d(2); Mz = d(3); % disturb

ship_xs(end+1) = x;
ship_ys(end+1) = y;

cf=cos(phi); sf=sin(phi);

% Right-hand sides
z(1) = -d11*Vx + m11*Px + m11*cf * Fx + m11*sf*Fy;
z(2) = -d22*Vy - d23*Wz + m22*Py - m22*sf*Fx +
m22*cf*Fy;
z(3) = -d32*Vy - d33*Wz + m33*Qz + m33*Mz;
z(4) = Vx*cf - Vy*sf;
z(5) = Vx*sf + Vy*cf;
z(6) = Wz;
end

```

В листинге 3 приведен код функции, которая вычисляет правые части уравнений экранного изображения и глубины сцены.

Листинг 3

```

function zz=image_pos(uu)
global im_xps im_yps im_xas;

% General parameters
zz=zeros(5,1);

fc = 1.0; % Camera focus distance

% Input parameters
xp = uu(1); yp = uu(2); xa = uu(3);
Zp = uu(4); Za = uu(5);
u = uu(6); v = uu(7); r = uu(8);

d1 = 0; d2 = 0; d3 = 0;

im_xps(end+1) = xp;
im_yps(end+1) = yp;
im_xas(end+1) = xa;

```

```

% Right-hand sides
zz(1) = (xp*u - v - (1+xp*xp) * r*Zp) / Zp + d1;
zz(2) = (yp*u - xp*yp*r*Zp) / Zp + d2;
zz(3) = (xa*u - v - (1+xa*xa) * r*Za) / Za + d3;
zz(4) = -u + r*xp*Zp;
zz(5) = -u + r*xa*Za;
end

```

В листинге 4 приведен код функции, которая формирует заданную скорость судна на основе информации, полученной с изображения.

Листинг 4

```

function zz=image_controller(uu)
    z    = uu(1:3);
    p    = uu(4:9);
    ksc  = uu(10:12);
    Zc   = uu(13:14);
    ksd  = uu(15:17);
    xp   = uu(10);
    yp   = uu(11);
    xa   = uu(12);
    zp   = uu(13);
    za   = uu(14);

    % Speed signal for e(t)
    K = 0.0015 * eye(3);
    V = K * (ksd - ksc);

    % Link matrix
    L = [xp/zp  -1/zp  -1-xp*xp;
         yp/zp   0      -xp*yp;
         xa/za  -1/za  -1-xa*xa];

    zz = L \ V;
end

```

В листинге 5 приведен код функции, которая формирует новое управляющее воздействие на судно на основе скорости, рассчитанной блоком изображения.

Листинг 5

```

function tau=ship_controller(u)
    global D;

```

```
% Input parameters
vd = u(1:3);
v = u(4:6);

Kd = diag([10e6 10e6 10e3]);
Kv = Kd \ (D + Kd);
tau = -Kd * (v - Kv * vd);
end
```