



КЛАССИЧЕСКИЕ РАБОТЫ. ОБЗОРЫ

Дистанционно управляемое мобильное устройство в форме глазного яблока: конструкция и управление сферическим подводным мобильным устройством посредством внутренних эксцентриков

И. Руст, Г. Асада

Разработано дистанционно управляемое мобильное устройство (ДУМУ), предназначенное для обследования подводных конструкций в опасных условиях. Представленное устройство может менять ориентацию так же, как глазное яблоко, используя оригинальный карданный подвес для перемещения внутренних эксцентриков. В сочетании с двумя тяговыми двигателями мобильное устройство может двигаться в любом направлении с неголономными связями. В данной работе представлено конструктивное решение с последующим динамическим и гидродинамическим анализом. Разомкнутая система обладает недостаточной устойчивостью, в связи с этим устойчивость повышается за счет использования бортовых датчиков, система которых была построена и рассчитана с помощью моделирования. В статье также представлено описание экспериментального образца.

1. Введение

В данной работе представлено небольшое подводное ДУМУ, которое будет использоваться для технического осмотра подводных конструкций в опасных условиях. При непосредственном осмотре многих из этих конструкций (например, ядерных реакторов) необходимы повышенные и дорогостоящие меры безопасности. Использование ДУМУ, однако, не требует этих мер безопасности. Таким образом, образец ДУМУ, представленный в данной работе, разработан для замещения человека-контролера в опасных подводных условиях и используется для передачи видеоизображений и других данных удаленному оператору во время технического осмотра.

Видеоизображение является наиболее важной составляющей технического осмотра, и поэтому управление ориентацией камеры, установленной на ДУМУ, представляется наиболее важным требованием, предъявляемым к конструкции. Надлежащее управление ориентацией позволит оператору нацеливать камеру в любом направлении. Кроме того, из-за возможных ограничений рабочего пространства (например, малый диаметр труб ~ 80 см),

I. S. Rust, H. H. Asada, *The eyeball ROV: Design and control of a spherical underwater vehicle steered by an internal eccentric mass*. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011, pp. 5855–5862. Пер. с англ. Е. В. Ветчанина.



изменение ориентации аппарата не должно приводить к поступательному движению или, в крайнем случае, должно приводить лишь к малым перемещениям.

Для выполнения этих требований предложен сферический робот с фиксированной камерой. Сферическая форма позволяет осуществлять повороты без изменения занимаемого устройством пространства (вращение на месте). Возможность вращения на месте позволяет оператору «смотреть» в любом направлении при перемещении аппарата как единого целого, подобно движению глазного яблока. Способность нацеливать камеру в любом направлении не может быть достигнута с использованием сервоприводов на стационарном ДУМУ, так как диапазон ориентации камеры будет ограничиваться механическим диапазоном движения сервоприводов.

Более того, такой метод управления применим для выравнивания подводных систем связи с линией прямой видимости. То же можно было бы сделать заменой камеры фотодетектором и излучателем или с помощью механизма, предназначенного для нацеливания фотодетектора и излучателя, и создания канала передачи данных [1].

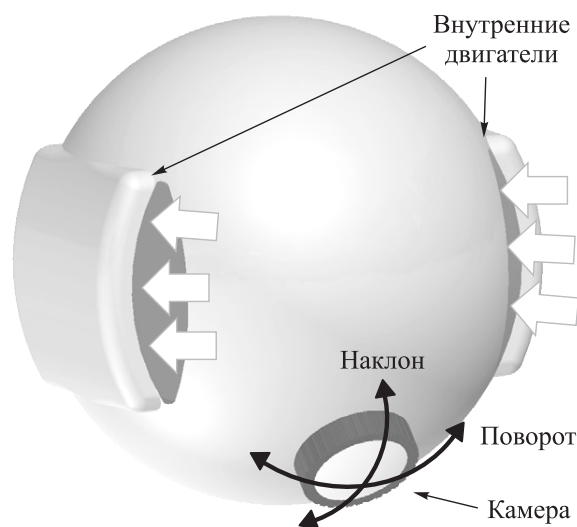


Рис. 1. Предлагаемое сферическое ДУМУ. Камера располагается на поверхности ДУМУ подобно тому как располагается зрачок относительно глазного яблока. Для проведения технического осмотра конструкций, находящихся ниже ДУМУ, камера устанавливается под углом к горизонтальной плоскости.

Вращательные движения производятся с помощью двух двигателей (устанавливаемых внутри для сохранения сферической формы) и внутреннего карданного механизма, используемого для смещения центра масс эксцентрика. Как будет показано ниже, этот карданный механизм позволяет совершать вращения с малым поступательным движением. Смещенный центр масс на карданном подвесе для управления вращением использовался для наземных мобильных устройств, но, насколько нам известно, такой механизм никогда не применялся в подводных мобильных устройствах [2, 3]. В данной работе исследуются задачи динамики и управления, связанные с использованием эксцентриков, которые весьма различны для наземных и подводных мобильных устройств.

В статье представлено конструктивное решение для реализации поворотов на месте сферического ДУМУ с использованием подвижного внутреннего эксцентрика. Кроме того, представлена модель устройства, а также система управления для взаимодействия с оператором.

2. Конструктивное решение

К конструкции ДУМУ предъявляются несколько технических требований:

1. Простая внешняя геометрия во избежание столкновений с выпуклыми объектами, расположенными в рабочем пространстве (например, сенсоры) и препятствующими движению.
2. Возможность поворота и наклона камеры, закрепленной на корпусе ДУМУ.
3. Ограниченное количество приводов для повышения надежности.
4. Малые габариты, обеспечивающие доступ в узкие каналы (например диаметром < 20 см) и сложные конструкции.

Предложенная конструкция направлена на удовлетворение этих требований.

Чтобы создать простую внешнюю геометрию, был разработан внутренний карданный механизм. Механизм позволяет использовать меньшее количество внешних двигателей и тем самым упростить внешнюю геометрию устройства, придав ему сферическую форму. Простая сферическая форма предотвращает застревания или столкновения мобильного устройства с выступающими препятствиями. Это удается благодаря тому, что при вращении не изменяется пространство, занимаемое сферой.

Карданный механизм создает два вращающихся момента без использования внешних элементов. Это осуществляется за счет отклонения центра масс (ЦМ) мобильного устройства от вертикальной осевой линии, проходящей через центр плавучести (ЦП) (см. рис. 3а). В результате ДУМУ начинает вращаться, уравнивая отклонение, до тех пор, пока центр масс не совпадет с вертикальной осевой линией (см. рис. 3б). Это происходит при отсутствии равнодействующей силы, то есть при условии равенства архимедовой силы и веса мобильного устройства. На рисунке 3 показан эффект смещения относительно оси y , создающего вращающийся момент относительно той же оси (тангаж); можно также создать момент относительно оси x (крен).

Дополнительное преимущество заключается в том, что новая ориентация центра масс становится устойчивой точкой системы относительно осей тангажа и крена и не требует какого-либо активного управления.

Положение центра масс изменяется с помощью карданного механизма, приводящего в движение стальной эксцентрик большой массы. Карданный механизм приводится в действие двумя моторами-редукторами постоянного тока. Далее будет показано, как входные

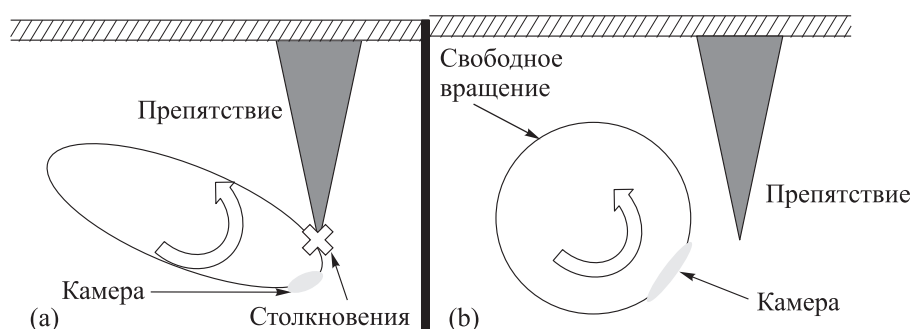


Рис. 2. Преимущество сферического ДУМУ при избежании столкновений. ДУМУ несферической формы с закрепленной на корпусе камерой может столкнуться с невидимым объектом (а). Сферическое же мобильное устройство (б) может вращаться на месте, избегая опасных столкновений.

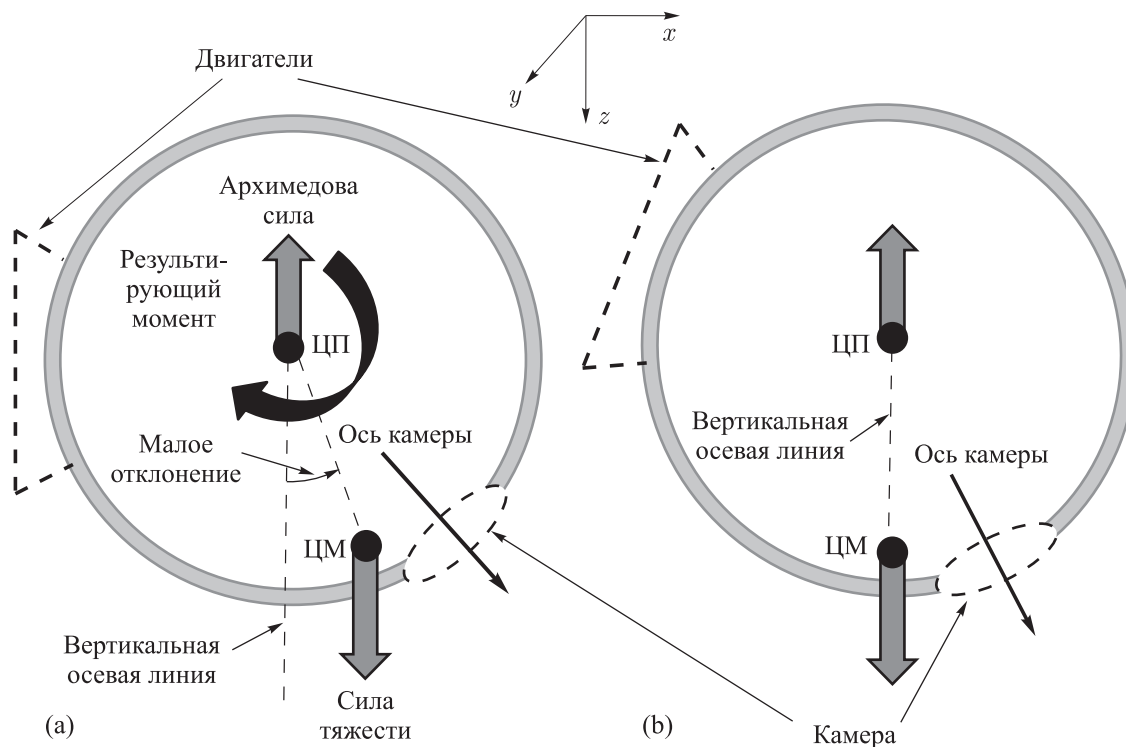


Рис. 3. Момент, создаваемый малым отклонением эксцентрика от вертикальной осевой линии, и происходящее под действием этого момента изменение ориентации. Равнодействующая сила отсутствует, так как предполагается, что ДУМУ обладает нейтральной плавучестью.

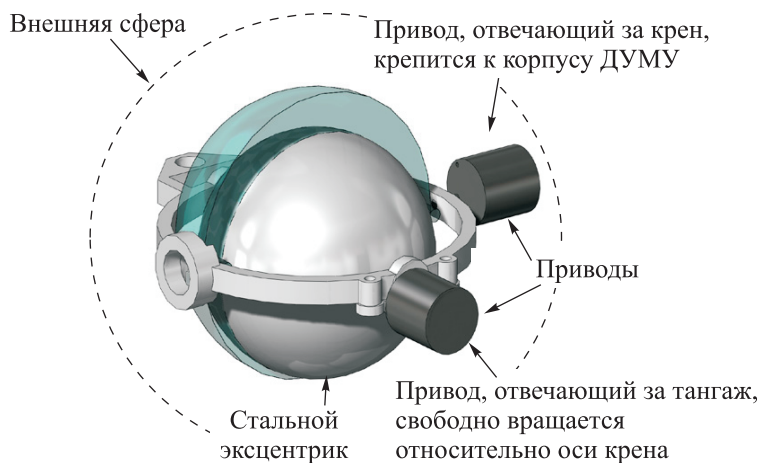


Рис. 4. Карданный механизм. Стальной эксцентрик большой массы, перемещаемый карданным механизмом.

моменты для этих моторов вычисляются на основе текущих смещений эксцентрика. На рисунке 4 изображена САД-модель карданного механизма.

Для того чтобы контролировать поворот и наклон камеры при любой ориентации, требуются три момента. Два момента, создаваемые эксцентриком, неизменны в инерциальной системе отсчета (на рис. 5 показаны используемые в статье системы отсчета). Этих двух моментов будет достаточно, если вращения, приводящие к повороту и наклону, идентич-

ны вращениям, изменяющим углы крена и тангажа, относительно инерциальной системы. Таким образом, не хватает третьего момента в направлении рысканья. Этот третий момент важен, так как он обеспечивает панорамирование, когда камера установлена так, как показано на рисунке 1. Камера установлена по углом 45° к вертикали, что позволяет производить осмотр конструкций, расположенных под ДУМУ.

Однако чрезвычайно сложно осуществлять управление рысканьем с помощью моментов относительно осей тангажа и крена в инерциальной системе [4]. Для создания этого момента используется два тяговых двигателя (см. рис. 1). Это также обеспечивает необходимую линейную силу для поступательного движения вперед (вдоль продольной оси). Таким образом, сочетание моментов от эксцентрика и пары тяговых двигателей используется для управления поворотом, наклоном и поступательным движением.

Преимущество внутреннего эксцентрика заключается в повышении надежности, так как для создания моментов используется меньшее количество приводов (по сравнению с традиционными двигателями). Для создания момента может использоваться только один винт или водоструйный двигатель, однако этот момент будет связан с линейной силой. Для создания момента, не связанного с перемещением, необходимо использовать два двигателя. Использование меньшего количества приводов повышает надежность конструкции за счет снижения вероятности отказа приводов.

Малые габариты нашего устройства обеспечивают доступ в узкие каналы и сложные конструкции и являются в высокой степени масштабируемыми. Внешний диаметр данной конструкции составляет порядка 12 см. Корректировка может быть произведена простым масштабированием внутреннего карданного механизма.

Итак, конструкция будет обладать следующими основными характеристиками:

1. Сферическая форма, способствующая вращательному движению без столкновений.
2. Управление поворотом и наклоном камеры, осуществляемое, главным образом, с помощью внутренних приводов.
3. Устойчивая ориентация относительно осей тангажа и крена благодаря смещению центра масс относительно центра плавучести.
4. Повышение надежности за счет малого количества приводов.
5. Легко масштабируемая конструкция.

Такое конструктивное решение позволяет создать ДУМУ с дефицитом управляющих воздействий. Хотя поступательное движение в направлениях поперечной (ось y) и вертикальной (ось z) качки в системе координат, связанной с телом, отсутствует, можно добиться того, чтобы при вращении на месте ДУМУ поворачивался в любом направлении, а затем двигался вперед.

3. Динамическая модель

3.1. Динамика мобильного устройства

Пусть $\mathbf{v} = [u, v, w]^T$ — линейные скорости мобильного устройства в системе координат, связанной с телом (связанная система координат), а $\boldsymbol{\omega} = [p, q, r]^T$ — угловые скорости устройства в направлениях тангажа, крена и рысканья в той же системе координат. Начало связанной системы координат совпадает с центром плавучести мобильного устройства и центром сферы.

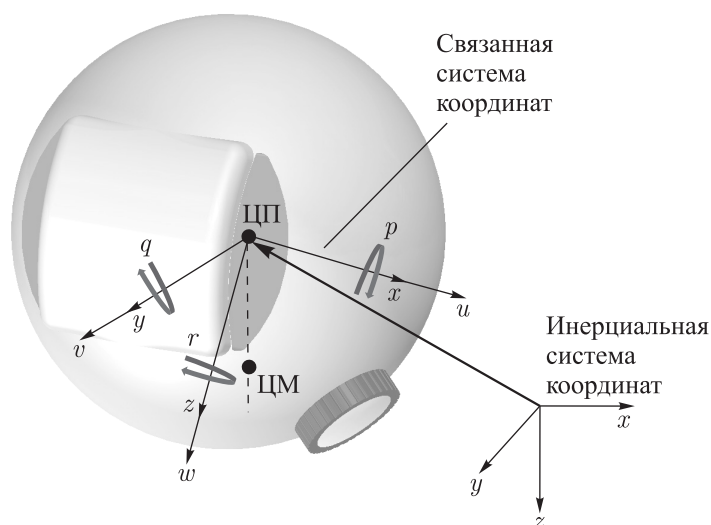


Рис. 5. Выбор систем координат. Связанная система координат соотнесена с телом таким образом, чтобы двигатели были ориентированы по направлению оси x . Связанная система координат отцентрирована по центру плавучести (то есть по центру сферы).

Без учета гидродинамических эффектов уравнения движения задаются в следующем виде [5, 6]:

$$\begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & ms(r_c^b) \\ ms(r_c^b) & R_e^b J (R_e^b)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ms(\omega) & 0 \\ ms(r_c^b)s(\omega) & s(\omega)R_e^b J (R_e^b)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = B_1 \tau_1. \quad (3.1)$$

Динамика определена, исходя из предположения, что тело не является жестким, так как центр масс движется внутри тела. Вследствие этого момент инерции, как и другие характеристики, уже не является постоянным. Делается предположение, что отклонения центра масс достаточно малы, и можно считать, что центр масс остается на вертикальной осевой линии. Это упрощает динамику и тем самым облегчает изучение системы. Так как это предположение игнорирует инерционные эффекты, связанные с малыми отклонениями от вертикали, вращающий момент карданного привода учтен в параметре τ_1 таким образом, как если бы он представлял собой внешний вращающий момент.

В уравнениях движения через m обозначается масса ДУМУ, через $J = \text{diag}[(J_x, J_y, J_z)]$ — тензор инерции относительно инерциальной системы. Тензор инерции рассматривается в инерциальной системе отсчета, так как центр масс всегда будет расположен почти вертикально под центром плавучести, если рассматривать их относительно той же инерциальной системы и не учитывать малые отклонения, используемые для контроля ДУМУ.

Кроме того, B_1 — входная матрица, а τ_1 — входное управление. Матрица векторного произведения $s(c)$ определяется как

$$s(c) = \begin{bmatrix} 0 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 0 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

где $c = [c_1 \ c_2 \ c_3]^T$ — произвольный вектор (например, $\omega \times v = s(\omega)v$).

Полагая, что центр масс всегда остается направленным вертикально вниз в инерциальной системе, положение центра масс r_c^b в связанной системе координат определяется в следующей форме [6]:

$$r_c^b = R_e^b r_c^e. \quad (3.3)$$

Радиус-вектор центра масс, используемый в (3.1) и (3.3), имеет вид

$$r_c^e = [0 \quad 0 \quad L]^T, \quad (3.4)$$

где L — расстояние между центром масс и центром плавучести. Для моделирования динамики этот вектор полагается постоянным (при условии малых управляющих отклонений, используемых для создания вращающих моментов).

Матрица R_e^b определяет поворот из инерциальной системы в связанную [5]:

$$R_e^b = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & s_\psi c_\theta & -s_\theta \\ -s_\psi c_\phi + c_\psi s_\theta s_\phi & c_\psi c_\phi + s_\psi s_\theta s_\phi & s_\phi c_\theta \\ s_\psi s_\phi + c_\psi s_\theta c_\phi & -c_\psi s_\phi + s_\psi s_\theta c_\phi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

где $c_x = \cos(x)$ и $s_x = \sin(x)$. Все углы являются углами Эйлера, определяющими ориентацию связанной системы координат относительно инерциальной.

Уравнения движения можно упростить, приведя их к следующему виду:

$$M_{ne} \dot{V} + C_{ne} V = B_1 \tau_1, \quad (3.6)$$

где $V = [v^T \quad \omega^T]^T$.

Также необходимо рассмотреть гидродинамические эффекты. Во-первых, матрица присоединенных масс M_a должна быть добавлена к матрице масс M_{ne} . Кроме того, имеется центростремительная матрица присоединенных масс C_a , матрица коэффициентов сопротивления D_{drag} , матрица коэффициентов подъемных сил D_{lift} , которые должны быть добавлены к C_{ne} . Эти дополнительные гидродинамические матрицы определены ниже. Для сферического тела все присоединенные массы составляют 50 % массы жидкости, вытесненной телом [6, 7]. Итак,

$$M_a = \frac{1}{2} \rho \bar{V} \cdot \text{diag}([1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]), \quad (3.7)$$

$$C_a = \frac{1}{2} \rho \bar{V} \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & s(v) \\ -s(v)^T & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

$$D_{drag} = \frac{1}{2} \rho A \cdot \text{diag}([c_{d,lin} \quad c_{d,lin} \quad c_{d,lin} \quad c_{d,rot} \quad c_{d,rot} \quad c_{d,rot}]), \quad (3.9)$$

$$D_{lift} = \frac{1}{2} \rho A c_{lift} \begin{bmatrix} s(\omega) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Здесь \bar{V} — объем ДУМУ, ρ — плотность воды, $c_{d,lin}$ — коэффициент сопротивления поступательному движению, $c_{d,rot}$ — коэффициент сопротивления вращательному движению, а c_{lift} — коэффициент подъемной силы [7, 8]. С учетом этих гидродинамических эффектов уравнения динамики принимают вид

$$M_T V + C_T V = B_1 \tau_1, \quad (3.11)$$

где $M_T = M_{ne} + M_a$ и $C_T = C_{ne} + C_a + D_{drag} + D_{lift}$.

3.2. Силы тяжести

На динамику системы из-за смещения центра масс силы тяжести влияют. Вследствие этого создается момент T_c^b , определяемый следующим образом:

$$T_c^b = R_e^b \cdot W \times \left((R_e^b)^{-1} R_m^b r_c^m \right). \quad (3.12)$$

Здесь матрица поворота R_m^b используется для определения положения центра масс относительно карданного привода (r_c^m) в связанной системе координат и вычисляется следующим образом:

$$R_m^b = \begin{bmatrix} c_{\theta_c} & s_{\theta_c} s_{\phi_c} & s_{\theta_c} c_{\phi_c} \\ 0 & c_{\phi_c} & -s_{\phi_c} \\ -s_{\theta_c} & c_{\theta_c} s_{\phi_c} & c_{\theta_c} c_{\phi_c} \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

В этом уравнении ϕ_c — положение привода, отвечающего за крен, а θ_c — положение привода, отвечающего за тангаж. Нулевое положение для каждого из этих углов соответствует тому, что центр масс эксцентрика лежит на оси z в связанной системе координат. Кроме того, r_c^m определяется как

$$r_c^m = [0 \quad 0 \quad L]^T. \quad (3.14)$$

Положение центра масс преобразуется в инерциальную систему отсчета умножением на обратную матрицу вращения $(R_e^b)^{-1}$.

Этот вектор, преобразованный к инерциальной системе, векторно умножается на вектор веса W ,

$$W = [0 \quad 0 \quad mg]^T, \quad (3.15)$$

определяющий силу тяжести, действующую на центр масс, где g — ускорение свободного падения.

Результат векторного умножения представляет собой вращающий момент в инерциальной системе. Далее он преобразуется обратно в связанную систему координат с помощью матрицы R_e^b .

С учетом гидродинамических и гравитационных эффектов уравнения динамики можно привести к следующему виду:

$$M_T \dot{V} + C_T V - G_T = B_1 \tau_1, \quad (3.16)$$

где $G_T = [0 \quad (T_c^b)^T]^T$.

Так как вектор T_c^b можно принять за управляющий вход (приводы смещают эксцентрик), то он объединяется с вектором τ_1 , который состоит из вращающих моментов карданных приводов и тяги двигателей. Поэтому уравнения движения принимают вид

$$M_T \dot{V} + C_T V = B_1 \tau_1 + G_T = B \tau. \quad (3.17)$$

3.3. Входное управление

Входное управление формируется из четырех величин:

$$\tau = [T \quad N_x \quad N_y \quad N_z]^T. \quad (3.18)$$



Они определяются следующим образом: суммарная тяга T двигателей, момент N_x , действующий в направлении крена, момент N_y , действующий в направлении тангажа, момент N_z , действующий в направлении рысканья. С учетом этих определений входная матрица B записывается в виде

$$B = \begin{bmatrix} [1 & 0 & 0]^T & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 1} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Для того чтобы преобразовать управляющие моменты в физические управляющие входные сигналы, необходимо рассмотреть динамику приводов. Три физических управляющих входных сигнала для трех моментов представляют собой вращающий момент привода, действующий в направлении тангажа, T_x , вращающий момент привода, действующий в направлении крена, T_y , тягу левого двигателя, T_1 , и тягу правого двигателя, T_2 . Для момента, создаваемого двигателями, следует также определить разницу между тягами, создаваемыми двумя двигателями, $\Delta T = T_1 - T_2$, далее «разность тяг».

Из (3.17) известно, что суммарный управляющий момент складывается из моментов, создаваемых вращением приводов и тягами двигателей, и момента, вызванного смещением эксцентрика:

$$P_m^b \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ \Delta T \end{bmatrix} + T_c^b = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

В этом уравнении P_m^b — матрица, используемая для преобразования вращающих моментов приводов и разности тяг в связанную систему координат. Она определяется как

$$P_m^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & 0 \\ 0 & -s_\phi & D/2 \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Первые две колонки матрицы P_m^b соответствуют транспонированному якобиану \mathbf{J} , определяемому как

$$\begin{bmatrix} d\phi \\ d\theta \\ d\psi \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} d\phi_c \\ d\theta_c \\ d\psi_c \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Третья колонка P_m^b представляет собой третью колонку единичной матрицы, умноженной на плечо рычага $D/2$. Вид этой колонки обусловлен тем, что момент разности тяг уже записан в связанной системе координат. Так получается потому, что двигатели закреплены на корпусе ДУМУ.

Чтобы определить вращающий момент приводов и разность тяг, необходимо вычесть величину эффектов смещения центра масс из требуемых моментов (что можно рассматривать как форму линеаризации обратной связи). Это означает просто видоизменение уравнения (3.20):

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ \Delta T \end{bmatrix} = (P_m^b)^{-1} \left(\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} - T_c^b \right). \quad (3.23)$$

Эти расчеты можно провести сразу после определения требуемых моментов N_x , N_y и N_z . Затем вычисленные вращающие моменты могут быть заданы карданным приводам, а тяги переданы левому и правому двигателям согласно уравнению

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} T \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (3.24)$$

Как отмечено ранее, вращающие моменты приводов инициируют смещения, из-за которых возникает момент T_c^b . Мы смоделировали эту динамику как простую систему второго порядка, описываемую следующими уравнениями движения:

$$\begin{aligned} - \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} - A_m R_m^b \frac{D}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta T \end{bmatrix} &= -A_m (R_m^b)^T T_w^b A_m^T + D_m \begin{bmatrix} \dot{\phi}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} + \\ &+ s \left(\begin{bmatrix} \dot{\phi}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} \right) \left(A_m \left((R_m^b)^T R_e^b J_{ball} (R_e^b)^T R_m^b \right) A_m^T \begin{bmatrix} \dot{\phi}_c \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} \right) + \\ &+ \left(A_m \left((R_m^b)^T R_e^b J_{ball} (R_e^b)^T R_m^b \right) A_m^T \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_c \\ \ddot{\theta}_c \end{bmatrix} \right), \end{aligned} \quad (3.25)$$

где $D_m = \text{diag}([D_{x,motor} \quad D_{y,motor}])$ — матрицы демпфирования, $J_{ball} = \text{diag}([J_{x,weight} \quad J_{y,weight} \quad J_{z,weight}])$ — тензор инерции внутренней массы в инерциальной системе отсчета, $T_c^b = R_e^b \times [0 \quad 0 \quad m_{weight}g] \times ((R_e^b)^{-1} R_m^b r_c^m)$ — момент силы тяжести, действующий на внутреннюю массу (m_{weight}), а A_m — матрица, исключаяющая элементы, соответствующие рысканью,

$$A_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

3.4. Сингулярность привода

Так как моменты, возникающие при смещении эксцентрика, известны относительно инерциальной системы отсчета, необходимо осуществить преобразование вращения, чтобы определить положение эксцентрика в связанной системе координат. При этом существует возможность того, что устройство войдет в особую конфигурацию, в которой закрепленные на корпусе двигателя, отвечающие за рысканье, будут создавать момент, дополнительный к моменту, создаваемому эксцентриком. Это положение может быть найдено из матрицы поворота R_e^b между двумя системами отсчета.

Особая ситуация возникает, когда один из третьих элементов первой или второй строк равен единице. Этими элементами являются $r_{13} = -s\theta$ и $r_{23} = s\phi c\theta$ (r_{xx} — элемент матрицы R_e^b). Они равны 1, когда

$$\theta = \pm \frac{(2n+1)\pi}{2} \quad (3.27)$$

или

$$\phi = \pm \frac{(2n+1)\pi}{2} \quad \text{и} \quad \theta = \pm 2\pi n. \quad (3.28)$$



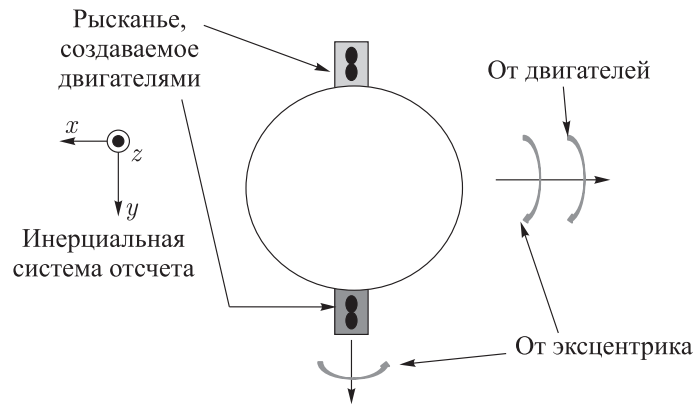


Рис. 6. Пример ориентации, которая создает сингулярность приводов.

Если один из элементов, указанных выше, равен 1, останутся лишь моменты относительно осей тангажа и крена, при наличии момента относительно оси z (рысканье) в инерциальной системе. Так как эксцентрик не может создать такой момент, то момент относительно этой оси будет отсутствовать.

К счастью, такие сингулярности не оказывают отрицательного воздействия на управляемость. Одна из причин состоит в том, что во многих из этих конфигураций вращающий момент двигателя все еще будет вносить вклад в момент, приводящий к рысканью. Это видно из матрицы P_m^b .

Кроме того, уже появились работы, в которых исследуется влияние избыточности приводов на отказоустойчивость [8, 9]. Многие из этих исследований могут быть применены к конструкции, представленной в данной работе.

3.5. Редукция динамики

Анализ входной матрицы B (3.19) показывает, что в направлениях y и z приводы отсутствуют. Однако динамика модели предполагает малые перемещения, вызываемые отклонением центра масс, а также наличием подъемной силы. В реальной физической системе (см. раздел 5), эти перемещения, согласно наблюдениям, оказались ничтожно малы. Фактически, динамика в направлениях y (наклон) и z (погружение) считается равной нулю. При таком допущении ДУМУ можно рассматривать как мобильное устройство с неголономными связями, аналогичное колесному автомобилю.

При этом условии уравнение динамики представляется в виде

$$M_{T,\text{red}}\dot{V}_{\text{red}} + C_{T,\text{red}}V_{\text{red}} = B_{\text{red}}\tau, \tag{3.29}$$

где $V_{\text{red}} = [u \ p \ q \ r]^T$, а все матрицы в уравнении динамики преобразуются следующим образом:

$$M_{T,\text{red}} = A_{\text{red}}M_T A_{\text{red}}^T, \quad C_{T,\text{red}} = A_{\text{red}}C_T A_{\text{red}}^T, \quad B_{T,\text{red}} = A_{\text{red}}B_T A_{\text{red}}^T, \tag{3.30}$$

где

$$A_{\text{red}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0_{1 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}. \tag{3.31}$$

Приведенные к данному виду уравнения динамики могут оказаться полезными при разработке закона управления для полной системы.



4. Построение системы управления

4.1. Устойчивость разомкнутой системы

Для изучения необходимости управления обратной связью в анализе устойчивости рассматривались полюсы разомкнутой системы. Для вычисления полюсов системы уравнения динамики линеаризуются следующим образом:

$$A = \left. \frac{\partial}{\partial V} (-M_T^{-1} C_T V) \right|_{V=\bar{V}}. \quad (4.1)$$

Линеаризация была получена в следующих точках:

$$\bar{V} = [\bar{u}, 0_{1 \times 5}]^T; \quad (4.2)$$

\bar{u} (скорость поступательного движения) изменяется, что порождает различные матрицы состояния, так как точки линеаризации различны. Собственные числа матриц состояний построены по отношению к \bar{u} (вместо традиционно используемого коэффициента усиления системы управления) и представлены на рисунке 7.

Неустойчивость также имеет место в случае вращательных движений. Линеаризация осуществлялась для состояния системы, характеризующегося вектором

$$\bar{V} = [0.02m/s \quad \bar{p} \quad 0_{1 \times 4}]^T. \quad (4.3)$$

При этом значение \bar{p} менялось, и были построены соответствующие полюсы для изменяющихся матриц состояния. Ненулевая скорость поступательного движения необходима для полного изучения эффектов вращения. Это было сделано и для двух других скоростей вращения.

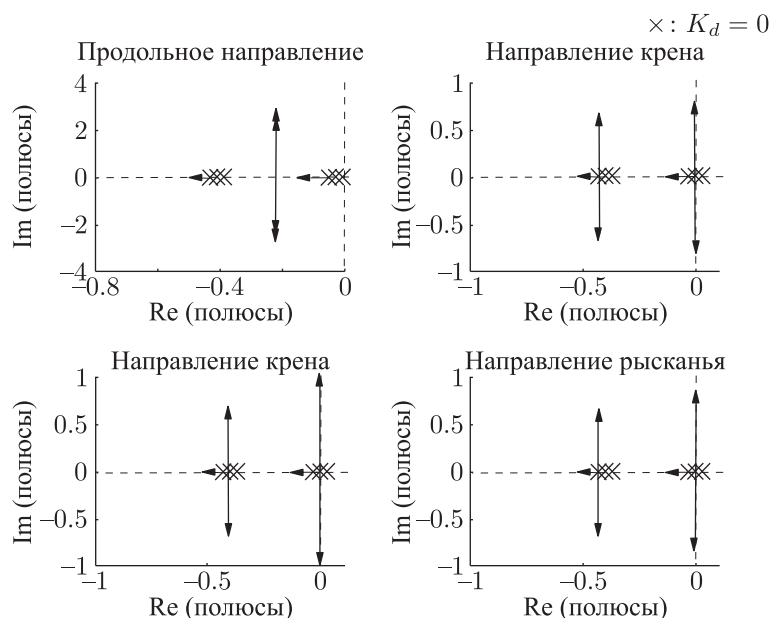


Рис. 7. Полюсы разомкнутой приведенной системы по отношению к скорости поступательного движения, а также к угловой скорости при постоянной поступательной скорости (20 см/с). Скорость поступательного движения изменялась от 0 см/с до 2 см/с, а все компоненты угловой скорости — от 0 рад/с до $\pi/4$ рад/с.

Четыре полюса комплексны во всех случаях, в силу чего возможно колебательное движение, которое будет создавать проблемы при позиционировании камеры. Повышение устойчивости достигается путем использования внутренней обратной связи, что позволяет расположить эти полюсы в левой полуплоскости.

4.2. Повышение устойчивости

Общая архитектура системы управления, отвечающей за повышение устойчивости, будет обладать вложенной структурой.

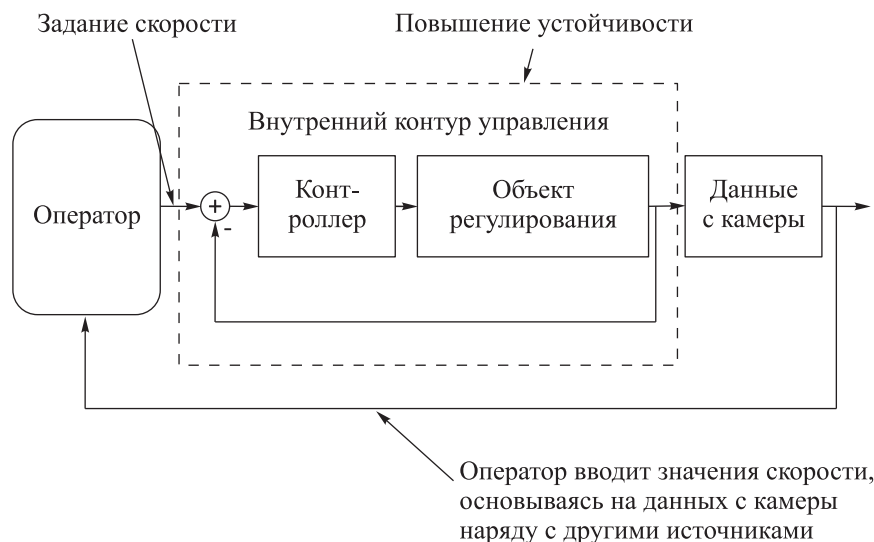


Рис. 8. Схема общей системы управления.

ДУМУ будет стабилизировать систему, используя входной сигнал от оператора в качестве эталона. Оператор во внешней цепи управления будет вводить эталонные скорости для внутренней управляющей цепи, опираясь на обратную видеосвязь.

Для корректного задания скорости во внутреннем контуре управления необходимо понимать характер взаимодействия оператора с ДУМУ. Одно из действий оператора — это поворот или наклон камеры. Оно осуществляется вращением устройства в двух направлениях. Другое действие — это перемещение устройства вперед или назад.

Таким образом, всего команд оператора три: сигнал поступательной скорости, а также сигналы двух угловых скоростей, соответствующих повороту и наклону камеры. Эти скорости обозначаются как v_{forward} , ω_{pan} и ω_{tilt} соответственно. Они преобразуются в связанную систему координат следующим образом (игнорируя направления бокового сноса и всплывания):

$$V_{\text{ref}} = \left[v_{\text{forward}} \quad -\frac{\sqrt{2}}{2}\omega_{\text{tilt}} \quad \omega_{\text{pan}} \quad \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_{\text{tilt}} \right]^T = [u_{\text{ref}} \quad p_{\text{ref}} \quad q_{\text{ref}} \quad r_{\text{ref}}]^T, \quad (4.4)$$

где u_{ref} — скорость в направлении оси x , а p_{ref} , q_{ref} и r_{ref} — скорости крена, тангажа и рысканья. Предполагается, что камера ориентирована под углом 45° к вертикали, как показано на рисунке 1.

4.3. Разработка П-регулятора

Наиболее простой путь повышения устойчивости заключается в пропорциональном регулировании. Этот способ особенно прост потому, что требуется лишь несколько недорогих датчиков обратной связи (то есть гироскопы и акселерометры).

Поскольку движение в направлениях боковой и вертикальной качки не управляется, мы будем изучать приведенную систему (3.29) для того, чтобы сформулировать управляющую команду, так как входная матрица обратима для приведенной системы, описывающей динамику. Для пропорционального регулирования необходимо создать следующее входное управление:

$$\tau = B_{\text{red}}^{-1}\gamma, \quad (4.5)$$

где γ — требуемый вход системы, определяемый как

$$\gamma = \begin{bmatrix} -K_{u,P}(u - u_{\text{ref}}) \\ -K_{p,P}(p - p_{\text{ref}}) \\ -K_{q,P}(q - q_{\text{ref}}) \\ -K_{r,P}(r - r_{\text{ref}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{u,P}\tilde{u} \\ -K_{p,P}\tilde{p} \\ -K_{q,P}\tilde{q} \\ -K_{r,P}\tilde{r} \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Здесь K_u , K_p , K_q и K_r — коэффициенты пропорционального усиления, а \tilde{u} , \tilde{p} , \tilde{q} и \tilde{r} — сигналы рассогласования. Когда сигналы подаются на вход полной системы, уравнения динамики принимают вид

$$M_T \dot{V} + C_T V = B(B_{\text{red}})^{-1}\gamma = [-K_{u,P}\tilde{u} \quad 0 \quad 0 \quad -K_{p,P}\tilde{p} \quad -K_{q,P}\tilde{q} \quad -K_{r,P}\tilde{r}]^T. \quad (4.7)$$

Для моделирования и экспериментов использовались следующие коэффициенты усиления:

$$K = [K_{u,P} \quad K_{p,P} \quad K_{q,P} \quad K_{r,P}]^T = [3 \quad 0.0625 \quad 0.0625 \quad 0.0625]^T. \quad (4.8)$$

Для определения полюсов замкнутой системы были найдены собственные значения следующей матрицы состояния:

$$A = \frac{\partial}{\partial V} \left(M_T^{-1}(-C_T V + B(B_{\text{red}})^{-1})\gamma \right) \Big|_{V=\bar{V}}. \quad (4.9)$$

С помощью линеаризации уравнений динамики относительно точки

$$\bar{V} = [0.02 \text{ м/с} \quad 0_{1 \times 8}]^T \quad (4.10)$$

были получены следующие собственные значения:

$$[-79.3 \quad -3.01 \quad -0.430 \quad -0.430 \quad -91.0 \quad -92.4]. \quad (4.11)$$

Устойчивость также имеет место для вращательных движений. При линеаризации системы относительно точки

$$\bar{V} = [0.02 \text{ м/с} \quad 0.1 \text{ рад/с} \quad 0_{1 \times 7}]^T \quad (4.12)$$

получены следующие собственные значения:

$$[-79.3 \quad -3.01 \quad -0.430 \pm 0.0745i \quad -91.0 \quad -92.4]. \quad (4.13)$$



На примере с точками линеаризации видно, что пропорциональное регулирование стабилизирует полную систему путем размещения всех полюсов в левой половине комплексной плоскости. В результате стабилизируются колебания, обнаруженные в разомкнутой системе, имеющей только одну пару полюсов низкой частоты в левой полуплоскости (см. (4.13)). Предполагается, что эта устойчивость сохраняется в окрестности точки линеаризации. Определение точной области представляет возможное направление будущих исследований.

Возможность полной стабилизации системы усиливает предположение о том, что линейные скорости в направлениях боковой и вертикальной качки равны нулю: даже в отсутствие управляющих воздействий в этих направлениях, система остается устойчивой.

4.4. Переходная характеристика скорости

Система пропорционального регулирования скорости была смоделирована для полной системы. Были найдены переходные характеристики для постоянной поступательной скорости и постоянной угловой скорости тангажа. Значения всех параметров можно найти в таблице 1. При моделировании коэффициенты усиления были теми же, что указаны в (4.8).

5. Прототип

Для тестирования данного конструктивного решения был построен простой экспериментальный образец, показанный на рисунке 11.

Камера в эксперименте не использовалась.

Во время первого теста эксцентрик был расположен под заданным углом с помощью ПИД-регулирования карданным приводом, отвечающим за тангаж. Ориентация ДУМУ определялась через интегрирование сигнала от гироскопа и сравнивалась с углом тангажа.

Это демонстрирует способность ДУМУ изменять ориентацию для разомкнутой системы. Видно, что позиция, в которую перемещается карданный привод, становится новой устойчивой точкой системы.

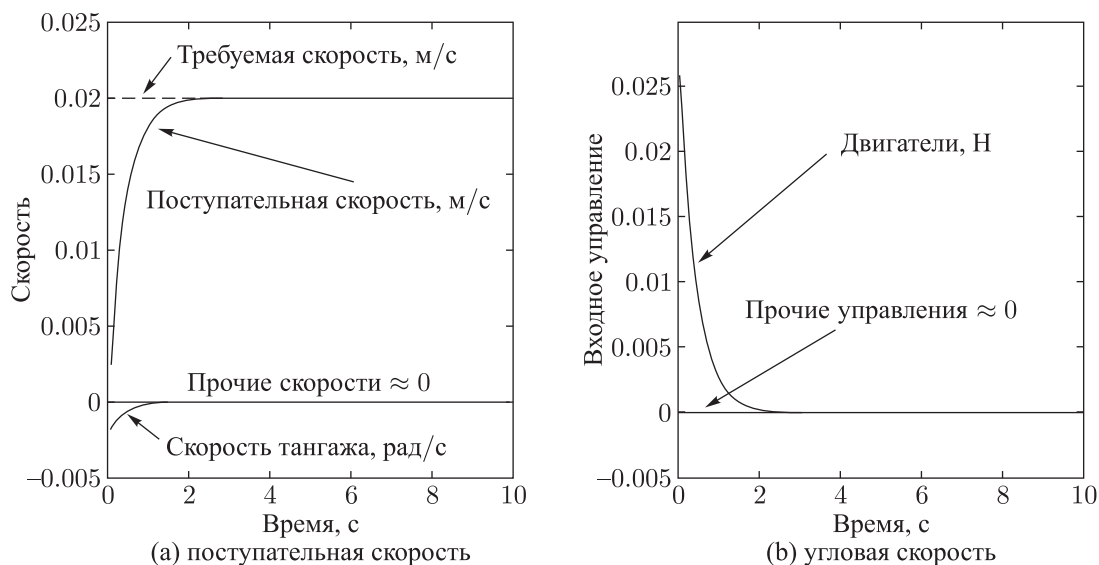


Рис. 9. Переходная характеристика для заданной поступательной скорости.

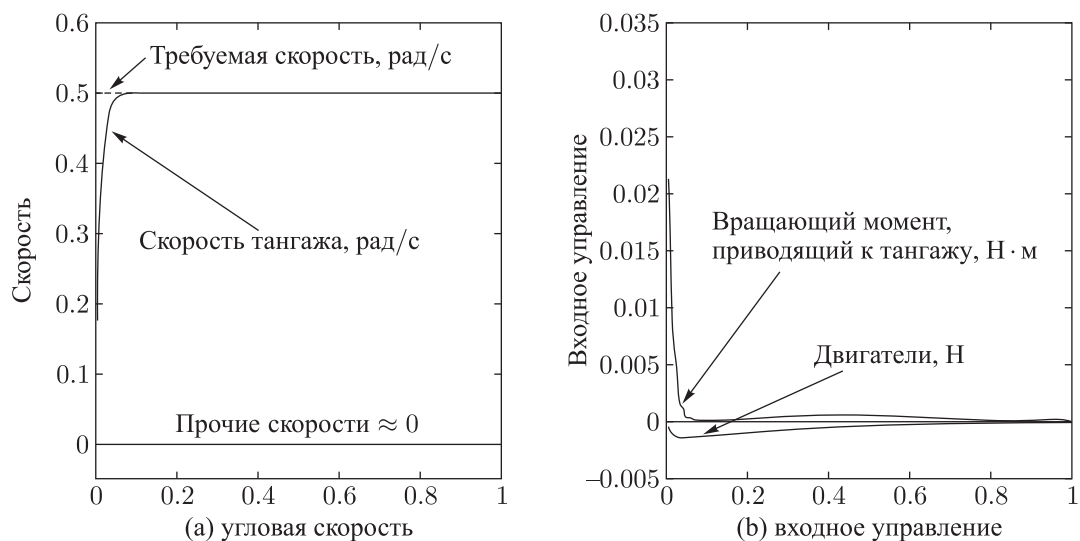


Рис. 10. Переходная характеристика для заданной угловой скорости относительно оси y (тангаж).

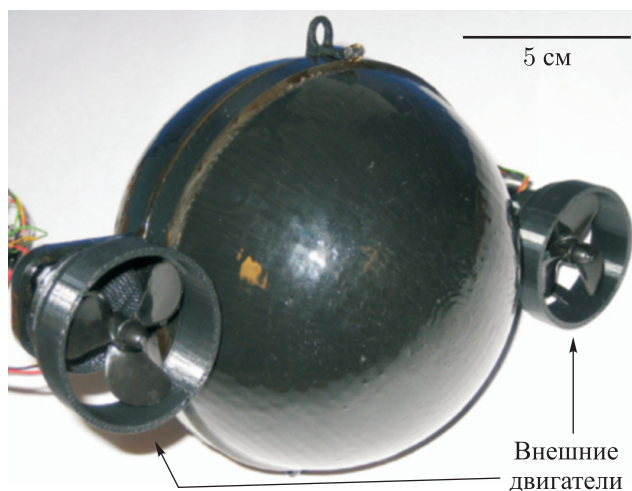


Рис. 11. Прототип, используемый для тестирования модели и системы управления. Для упрощения используются два внешних двигателя.

Кроме того, был поставлен эксперимент по регулированию угловой скорости относительно оси тангажа с использованием коэффициентов усиления (4.8).

Это показывает осуществимость управления скоростью физической системы. Теоретически, будущие прототипы с внутренними двигателями будут вести себя аналогично, а добавление беспроводной связи удалит возмущения, вносимые тросом.

6. Заключение

В данной статье представлено новое конструктивное решение сферического ДУМУ, имеющего своей целью перемещение камеры, закрепленной на корпусе мобильного устройства. Преимущества такой конструкции подробно обоснованы выше, а кроме того, дан анализ динамики и устойчивости.

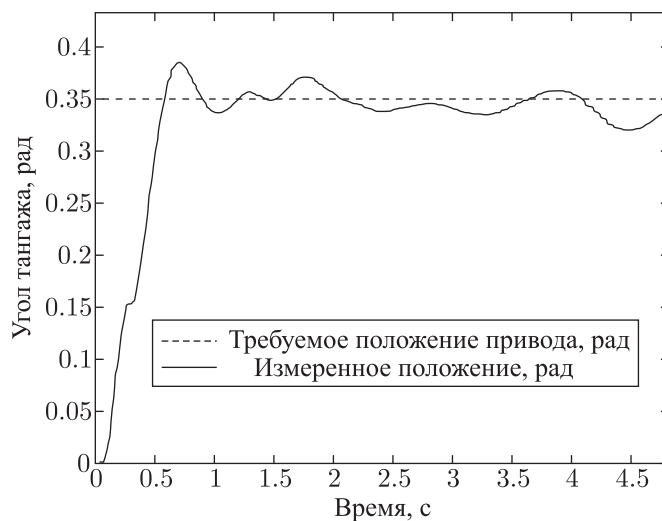


Рис. 12. Реакция устройства на шаговый вход карданного привода, отвечающего за тангаж.

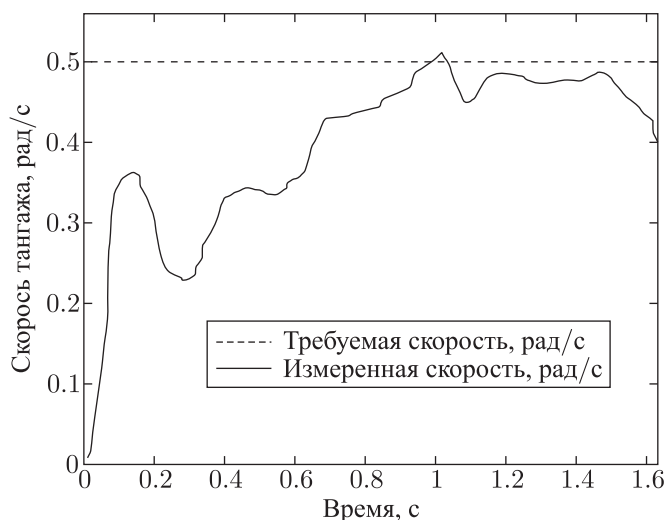


Рис. 13. Экспериментальная и смоделированная переходные характеристики для скорости тангажа. Присутствуют некоторые эффекты возмущения колебаний из-за наличия троса.

Пропорциональный контроллер успешно обеспечивает повышение устойчивости системы, даже если система обладает дефицитом управляющих воздействий, что позволяет использовать простую архитектуру системы управления для данной сложной механической системы. Простота реализации была успешно продемонстрирована на экспериментальном образце.

Устойчивая конструкция ДУМУ с простой внешней сферической геометрией облегчает технический осмотр подводных объектов и позволяет оператору вести наблюдение в любом направлении при малых поступательных перемещениях устройства. Описанная конструкция может быть использована для устойчивого управления ориентацией устройств с камерой, включая системы коммуникаций с линией прицеливания. Таким образом, данная широко применимая конструкция позволяет повысить безопасность при проведении разнообразных видов технических осмотров подводных объектов в опасных средах.

Приложение

Таблица 1. Физические параметры и значения [10]

Параметр	Описание	Значение
L	расстояние от центра плавучести до центра масс	3.5 мм
D	диаметр, на котором закреплен винт двигателя	12 см
\bar{V}	объем ДУМУ	$9.05 \times 10^{-4} \text{ м}^3$
A	площадь поперечного сечения ДУМУ	$11.3 \times 10^{-3} \text{ м}^2$
m	масса ДУМУ	0.815 кг
m_{weight}	масса стального эксцентрика	0.550 кг
J_x	момент инерции ДУМУ относительно оси x в инерциальной системе	$7.81 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
J_y	момент инерции ДУМУ относительно оси y в инерциальной системе	$7.81 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
J_z	момент инерции ДУМУ относительно оси z в инерциальной системе	$7.78 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
$J_{x,\text{weight}}$	момент инерции внутреннего груза относительно оси x в инерциальной системе	$1.49 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
$J_{y,\text{weight}}$	момент инерции внутреннего груза относительно оси y в инерциальной системе	$1.49 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
$J_{z,\text{weight}}$	момент инерции внутреннего груза относительно оси z в инерциальной системе	$1.49 \times 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
$D_{x,\text{motor}}$	коэффициент демпфирования для карданного привода крена	0.5 Н · с
$D_{x,\text{motor}}$	коэффициент демпфирования для карданного привода тангажа	0.5 Н · с
$c_{d,\text{lin}}$	коэффициент сопротивления поступательному движению	0.001
$c_{d,\text{rot}}$	коэффициент сопротивления вращению	0.002
$c_{d,\text{lift}}$	коэффициент подъемной силы	0.2

Список литературы

- [1] Fair N., Chave A.D., Freitag L., Preisig J., White S.N., Yoerger D., Sonnichsen F. Optical modem technology for seafloor observatories // Proc. of the Conf. MTS/IEEE «Oceans 2006» (Boston, Mass., 18–21 Sept. 2006), 6 pp.
- [2] Halme A., Suomela J., Schonberg T., Wang Y. A spherical mobile micro-robot for scientific applications // Proc. of the 4th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robot Applications (Noordwijk, 1996), pp. 321–327.
- [3] Javadi A. H., Mojabi P. Introducing August: A novel strategy for an omnidirectional spherical rolling robot // Proc. of the 2002 IEEE Internat. Conf. on Robotics & Automation (Washington, D.C., May 2002): Vol. 4, pp. 3527–3533.
- [4] Longuski J. M., Panagiotis T. Spin-axis stabilization of symmetric spacecraft with two control torques // Syst. Control Lett., 1993, vol. 23, pp. 395–402.



- [5] Fossen Th. I. Guidance and control of ocean vehicles. Chichester: Wiley, 1994. 494 pp.
- [6] Siciliano B., Khatib O., Groen F. Underwater robots: Motion and force control of vehicle-manipulator systems. 2nd ed. (Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 2.) New York: Springer, 2006. 268 pp.
- [7] Korotkin A. I. Added mass of ship structures. (Fluid Mech. Appl., vol. 88.) New York: Springer, 2009. 404 pp.
- [8] Podder T. K., Antonelli G., Sarkar N. Fault-accommodating thruster force allocation of an AUV considering thruster redundancy and saturation // IEEE Trans. Robot. Automat., 2002, vol. 18, no. 2, pp. 223–233.
- [9] Podder T. K., Antonelli G., Sarkar N. Fault tolerant control of an autonomous underwater vehicle under thrust redundancy: Simulation and experiments // Proc. of the 2000 IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation (San Francisco, Calif., April 24–28, 2000): Vol. 2, pp. 1251–1256.
- [10] White F. M. Fluid mechanics. 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 1999. 1023 pp.

The eyeball ROV: Design and control of a spherical underwater vehicle steered by an internal eccentric mass

Ian C. Rust, H. Harry Asada

A Remotely Operated Vehicle (ROV) is developed for use in the inspection of underwater structures in hazardous environments. The vehicle presented can change orientation like an eyeball using a novel gimbal mechanism for moving an internal eccentric mass. Combined with a pair of thrusters, the Eyeball ROV can move in any direction with non-holonomic constraints. In this paper the design concept is presented first, followed by dynamic and hydrodynamic analysis. Due to poor open loop stability characteristics, stability augmentation is implemented using onboard sensors and was designed and tested in simulation. A physical proof-of-concept prototype is also presented.

Citation: *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2014, vol. 10, no. 4, pp. 513–531 (Russian)