ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК

издатель ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Использование исполнительных датчиков и инерциальной навигационной системы для стабилизации и управления движением двуногого шагающего робота

77-48211/521938

12, декабрь 2012 Ковальчук А. К., Кулаков Д. Б., Семёнов С. Е., Яроц В. В. УДК 681.5

> Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>alexkov2012@rambler.ru</u>, <u>mitkul@rambler.ru</u> <u>a1e10@rambler.ru</u> vyaroz@yandex.ru

Введение

Известны работы авторов, где рассматриваются математические модели инерциальных навигационных систем и алгоритмы обработки информации с силомоментных датчиков различных конструкций. Однако, в этих работах отсутствуют исследования их совместной работы для целей стабилизации и управления исполнительным механизмом двуногого шагающего робота.

<u>Постановка задачи.</u> Для стабилизации и управления исполнительных механизмом двуногого шагающего робота необходимо решить следующие задачи:

- 1. Разработать алгоритм определения сил и моментов, действующих на стопы робота со стороны опорной поверхности.
- 2. Определить текущее положение и параметры движения робота путём использования алгоритма обработки информации с инерциальной навигационной системы.
- 3. Разработать алгоритм управления силами и моментами в приводах на опорных стопах с целью стабилизации робота и управления его движением.

Задачи стабилизации двуногого шагающего робота

Во время ходьбы ДШР непрерывно взаимодействует с опорной поверхностью. Силы и моменты, действующие на его стопы, во многом определяют характер движения и несут в себе информацию, которая может быть использована при управлении движением. Величины этих сил зависят от текущей конфигурации исполнительного механизма, скоростей и ускорений в управляемых и неуправляемых степенях подвижности, моментов, развиваемых приводами, характера опорной поверхности.

При реализации движения, рассчитанного в предыдущей главе, неизбежно возникают отклонения от расчётных траекторий. Это происходит, в том числе, по следующим причинам:

- алгоритм расчета траекторий использует упрощенную модель динамики робота;
- во время движения на робот действуют различные неучтённые силы;
- опорная поверхность имеет форму, отличную от принятой в модели;
- приводы имеют ограниченную динамическую точность.

Для удержания робота на расчетных траекториях необходима система стабилизации. Основной контур замыкается по сигналам системы ориентации робота. Вне зависимости от принципа действия она должна выдавать матрицу ориентации какого-либо звена робота, например корпуса. Управлять ориентацией корпуса можно разными способами. Наиболее удобны, видимо, управление моментом на опорной стопе (стопах), коррекция положения следующей опорной точки.

Соотношение сил и моментов на стопах зависит от характера их контакта с опорной поверхностью (плотности прилегания, перекосов и т.д.). Компенсация этих неточностей позволяет адаптироваться к опорной поверхности и избежать качания стопы на неровностях, т.е. неконтролируемого изменения связей, наложенных на стопу в процессе движения. В двухопорной фазе информация о силах и моментах позволяет компенсировать ошибки системы приводов робота и избежать значительного взаимного нагружения приводов за счёт образования замкнутой кинематической цепи и вызванного им неконтролируемого проскальзывания стоп относительно опорной поверхности.

Таким образом, можно выделить следующие задачи, решаемые с использованием информации от силомоментных датчиков стоп (СМД):

-измерение сил и моментов, действующих на стопы со стороны опорной поверхности;

-определение по этим силам и моментам погрешностей контакта стоп с опорной поверхностью, вычисление величин поправок, которые необходимо внести в программное движение;

-управление силами и моментами на опорных стопах с целью управления движением робота и его стабилизации.

Для управления моментом на стопе с использованием следящих по положению приводов и податливой стопы можно использовать два подхода.

Первый предполагает знание геометрии опорной поверхности и упругих свойств стопы. Требуемый момент пересчитывается в соответствующий ему доворот опорной стопы. Второй подход предполагает глубокую обратную связь в системе приводов по силам и моментам в опорной стопе. Рассмотрим более подробно первый из них.

Обработка информации, поступающей от силомоментных датчиков в процессе ходьбы двуногого шагающего робота

Силомоментные датчики, примененные на лабораторном ДШР, имеют известную крестообразную схему с подвесом на упругих пластинах. Схема силомоментного датчика показана на рисунке 1. Измерительные балки датчика с наклеенными на них фольговыми тензорезисторами закреплены к центральному блоку, установленному на стопе ДШР, и через

упругий подвес к внешней рамке. Внешняя рамка закреплена на подошве таким образом, чтобы между ее верхней плоскостью и нижней плоскостью центрального блока образовался небольшой зазор. Величина этого зазора подобрана так, что при вертикальных нагрузках, превышающих допустимые, центральный блок упирается в подошву, что защищает датчик от повреждения при ударе об опорную поверхность. Снизу к подошве приклеены резиновые упругие кубики.



Рис. 1. Схема силомоментного датчика стоп

Вопросы обработки сигналов СМД промышленных роботов подробно рассмотрены в литературе, однако ДШМР имеет ряд существенных особенностей, поэтому рассмотрим их подробнее. Целью обработки сигналов является получение вектора сил и моментов, действующих на стопу со стороны опорной поверхности. Входными данными для алгоритма обработки является векторы **c**_j (j – номер стопы) входных кодов АЦП, зависящий от напряжений разбаланса тензомостов, а также различных помех, действующих как в самом АЦП, так и в устройствах, подключенных к его входу. Таким образом, алгоритм обработки должен включать в себя следующие две основные части:

1- фильтрацию входных кодов с целью формирования векторов $\mathbf{c}_{j}(t)$;

полезных сигналов;

2- вычисление компонент вектора $F_{on}(t)$ сил и моментов отн некоторого полюса p_0 , действующих на ДШР со стороны опорной поверхности.

Пункт 1 может быть реализован различными методами цифровой фильтрации. В системе управления данного робота применен линейный цифровой фильтр второго порядка.

Векторы **с**_j кодов АЦП зависят от моментов, действующих в заделках измерительных балок и следовательно от сил P_{ij} (i – номер силы измерительной балки j-й стопы), действующих на концах измерительных балок (рис. 2).

$$P_{ij}=k_{ij}c_{ij}, i=1, 2, ..., 8,$$

где с_{іj} - і-й компонент вектора кодов АЦП j-й стопы;

k_{ij} - коэффицент передачи 1^{-го} канала j-й стопы;

Р_{іј}- і^{-я} сила в СМД ј-й стопы.

Введем вектор ${}^{D}F_{j}$ -сил и моментов, действующих на стопу ј ДШР в системах координат датчика ј:

$${}^{a}F_{j} = ({}^{a}F_{xj}, {}^{a}F_{yj}, {}^{a}F_{zj}, {}^{a}M_{xj}, {}^{a}M_{yj}, {}^{a}M_{zj})^{T}.$$

Тогда

$$^{\mu}F_{j}=K_{j}c_{j}$$

где матрица К_ј имеет вид:

$$K_{j} = \begin{bmatrix} 0 & k_{2j} & 0 & k_{4j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{1j} & 0 & k_{3j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{5j} & k_{6j} & k_{7j} & k_{8j} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & lk_{6j} & 0 & -lk_{8j} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -lk_{5j} & 0 & lk_{7j} & 0 \\ lk_{1j} & -lk_{2j} & lk_{3j} & -lk_{4j} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

где *l* – конструктивный параметр датчика (рис. 2).

Полный вектор всех сил и моментов отн. некоторого полюса p_0 , действующих на ДШР со стороны опорной поверхности определим по формуле:

$$\overline{F}_{on} = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z,)^T =$$

$$=\sum_{j=m,n}\left[\frac{R_{j}^{j}R_{\mathcal{A}j}}{\Omega(p_{j}-p_{0})R_{j}^{j}R_{\mathcal{A}j}}\left|\frac{0}{R_{j}^{j}R_{\mathcal{A}j}}\right]^{\mathcal{A}}F_{j},$$

где m и n – номера стоп;

матрица Ω(P) - позволяет вычислить векторное произведение

$$\Omega(p)F = pxF.$$

Коррекция положения стоп двуногого шагающего робота

В двухопорной фазе обе стопы опорные. Будем называть ведущей стопой ту, которая была опорной в предшествующей одноопорной фазе ходьбе (присвоим ей индекс *o*). Бывшую переносимую будем называть ведомой (присвоим ей индекс *n*).

При постановке переносимой стопы на опорную поверхность неизбежно возникают неточности, вызывающие несовпадение плоскостей стоп и опорной поверхности. Робот

будет стоять неустойчиво, поэтому в двухопорной фазе необходимо корректировать взаимные положение и ориентацию стоп.





Рис. 2. Силы и моменты, действующие на СМД

Так как стопы ДШР обладают податливостью, расстояния и углы, на которые необходимо переместить переносимую стопу,

определяются (6х6) матрицами жесткости C_m и C_n. Эти матрицы зависят от того, в какой системе координат они вычислены. Для данного робота в системах координат датчиков они будут диагональными.

Введём систему координат {l, m, n} (рис. 3), для которой направляющие векторы в абсолютной системе координат вычисляются следующим образом:



Рис. 3. Система координат {1, m, n}

$$l = \frac{p_n - p_0}{\left|p_n - p_0\right|},$$

где *l* – это вектор, направленный от полюса ведущей стопы к полюсу ведомой;

 $\boldsymbol{m} = (m_1, m_2, m_3)^{\mathrm{T}}$ – вектор, лежащий в горизонтальной плоскости и перпендикулярный вектору *l*:

$$m_{1} = \sqrt{\frac{l_{2}^{2}}{l_{2}^{2} - l_{1}^{2}}}$$
$$m_{2} = -\frac{l_{1}m_{1}}{l_{2}} ;$$
$$m_{3} = 0$$

n = l x m – третий направляющий вектор базиса (направлен вверх).

Определим корректирующие векторы ΔS_0 и ΔS_n :

$$\Delta S = (\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)^T$$

Инженерный вестник

Для этого введем коэффициенты нагруженности стоп робота в двухопорной фазе, показывающие ожидаемое распределение нагрузки между стопами:

$$k_{\mu o} = \frac{F_{no^*}}{F_{no^*} + F_{nn^*}}$$
$$k_{\mu n} = \frac{F_{nn^*}}{F_{no^*} + F_{nn^*}},$$

где F_{no*} –прогнозируемая сила, действующая на ведущую стопу в направлении n;

 F_{nn^*} – прогнозируемая сила, действующая на ведомую стопу в направлении n.

Необходимые корректирующие движения определяются податливостью стоп и, соотв., нагрузками (силами вдоль и моментами вокруг направлений *l*, *m*, *n*)

Вследствие погрешностей позиционирования стоп вдоль оси *l* возникает сила, стремящаяся сдвинуть (раздвинуть стопы), а вокруг оси *n* – развернуть из в противоположные стороны. Из-за перекосов стоп отн. опорной поверхности возникают моменты, разворачивающий стопы отн. друг друга вокруг осей *l* и *m*.

Введем векторы компенсирумых сил и моментов

$$\Delta F_{o} = (F_{lo}, F_{mo}, F_{no}, M_{lo}, M_{mo}, M_{no})^{T}.$$
$$\Delta F_{n} = (F_{ln}, F_{mn}, F_{nn}, M_{ln}, M_{mn}, M_{nn})^{T}.$$

Рассчитаем компоненты этих векторов.

Для исключения взаимного нагружения вдоль *l* необходимо, чтобы силы, действующие на стопы вдоль этого направления были равны, т.е.

$$\Delta F_l = F_{ln} - F_{lo} = 0.$$

Распределим компенсирующее действие стоп обратно пропорционально нагрузке на стопах вдоль **n** пропорционально коэффициентам нагруженности комплиментарных стоп. При этом учтем, что сумма этих коэффициентов равна 1.

$${}^{lmn}\Delta F_{lo} = -k_{nn}\Delta F_{l}$$
$${}^{lmn}\Delta F_{ln} = k_{no}\Delta F_{l}$$

Силы, действующие вдоль направлений **m** и **n** определяют движение робота по положению и углу, поэтому оставим их без изменений, т.е.

$${}^{lmn}\Delta F_{mo} = 0$$
$${}^{lmn}\Delta F_{mn} = 0$$
$${}^{lmn}\Delta F_{no} = 0$$
$${}^{lmn}\Delta F_{nn} = 0$$

Для исключения взаимного нагружения вокруг l необходимо, чтобы соотв. моменты на стопах были распределены пропорционально коэффициентам нагруженности. Желаемые моменты на стопах с учетом пока неизвестного коэффициента k:

$$M_{\mathcal{H}O} = k \cdot k_{HO}$$
$$M_{\mathcal{H}O} = k \cdot k_{HO}$$

При этом из-за действующего скручивающего момента реальные моменты на стопах:

$$M_{lo} = M_{\mathcal{H}co} - \Delta M_{l}$$
$$M_{ln} = M_{\mathcal{H}cn} + \Delta M_{l}$$

Тогда

$$k = M_{lo} + M_{ln}$$

$$\Delta M_{l} = (M_{lo} + M_{ln})k_{Ho} - M_{lo} =$$

= $M_{ln} - (M_{lo} + M_{ln})k_{Hn} =$
= $\frac{M_{n}F_{no*} - M_{o}F_{nn*}}{F_{no*} + F_{nn*}}$

Корректирующее действие распределим пропорционально коэффициентам нагрузки комплиментарных стоп

$${}^{lmn}\Delta M_{lo} = -k_{Hn}\Delta M_{l}$$
$${}^{lmn}\Delta M_{ln} = k_{Ho}\Delta M_{l}$$

В двухопорной фазе моменты на стопах вдоль оси **m** вредны, если точка нулевого момента находится между центрами стоп, и необходимы для стабилизации движения, если она перемещается на внешние края стоп. Ситуацию можно оценить используя коэффициенты нагруженности стоп.

Тогда

$$\begin{cases} {}^{lmn}\Delta M_{mo} = 0, ec_{\pi u}(M_{mo} > 0) \land (k_{\mu o} > k_{\mu o \max}) \\ {}^{lmn}\Delta M_{mo} = M_{mo}, ec_{\pi u}(M_{mo} < 0) \lor (k_{\mu o} < k_{\mu o \max}) \end{cases} \\ \begin{cases} {}^{lmn}\Delta M_{mn} = M_{mn}, ec_{\pi u}(M_{mn} > 0) \lor (k_{\mu n} < k_{\mu n \max}), \\ {}^{lmn}\Delta M_{mn} = 0, ec_{\pi u}(M_{mn} < 0) \land (k_{\mu n} > k_{\mu n \max}) \end{cases} \end{cases}$$

где k_{ноmax} и k_{нnmax} - фактически являются коэффициентами запаса. Аналогично определим корректирующие моменты вдоль **n**.

$$\begin{cases} {}^{lmn}\Delta M_{no} = 0, & ecnu & k_{Ho} > k_{Ho} \max \\ {}^{lmn}\Delta M_{no} = M_{no}, & ecnu & k_{Ho} < k_{Ho} \max \end{cases}$$
$$\begin{cases} {}^{lmn}\Delta M_{nn} = M_{nn}, & ecnu & k_{Hn} < k_{Hn} \max \\ {}^{lmn}\Delta M_{nn} = 0, & ecnu & k_{Hn} > k_{Hn} \max \end{cases}$$

По известным векторам компенсируемых сил и моментов ΔF_0 и ΔF_n определим необходимые компенсирующие движения стоп

$$\Delta S_o = R_o (^{o}C_o^{-1})R_o^T R_{lmn} {}^{lmn}\Delta F_o$$

$$\Delta S_n = R_n (^{n}C_n^{-1})R_n^T R_{lmn} {}^{lmn}\Delta F_n$$

где ${}^{i}C_{i}$ - матрица жесткости стопы, выраженная в системе координат стопы i;

R_i – матрица ориентации стопы i;

 R_{lmn} – матрица перехода из системы {l,m,n} в абсолютную систему:

$$R_{lmn} = \left(\vec{l} \mid \vec{m} \mid \vec{n} \right),$$

где *l*, *m*, *n* – орты системы {*l*,*m*,*n*}.

Обработка и использование в процессе управления ДШР информации от датчика угловых скоростей и акселерометров

Для управления движением робота необходима информация о его текущих положениях и параметрах движения в пространстве. Полностью решить эту задачу достаточно сложно, так как для этого требуется сложная и дорогая аппаратура. Кроме того, многие параметры, характеризующие движение и положение робота в пространстве можно получить косвенно. Однако для обеспечения устойчивости робота абсолютно необходима достоверная информация о его ориентации в пространстве. Для этого можно использовать различные системы:

-гиростабилизированные платформы;

-гиромаятники;

-бесплатформенные системы ориентации, использующие датчики угловых скоростей (ДУС) как гироскопические, так и использующие другие физические принципы.

После оценки соотношения цена/качество для данного робота была выбрана бесплатформенная система ориентации с гироскопическими ДУС. Качество работы такой системы в значительной степени зависит от эффективности алгоритмов обработки информации, получаемой непосредственно с первичных датчиков.

В качестве первичных датчиков примененная на данном ДШМР система ориентации использует три датчика угловых скоростей типа ДУС-32М и три акселерометра типа АД-3.

Датчики расположены в виброизолированном блоке, установленном в корпусе робота, а их оси чувствительности ориентированы вдоль осей связанной с корпусом системы координат.

Аналоговые сигналы с датчиков через АЦП вводятся в компьютер системы управления робота, и далее с частотой 100 Гц производится их обработка с целью получения информации об угловом положении корпуса робота, угловой скорости и линейных ускорениях.

Угловое положение твердого тела можно характеризовать различными способами, например углами Эйлера или матрицей направляющих косинусов (матрицей ориентации). В данной системе выбран последний способ.

Для их вычисления выполняется следующий алгоритм:

1. Считываются коды с каналов АЦП, связанных с акселерометрами, производится их первичная цифровая фильтрация, производится преобразование масштабов и определяется вектор единичной массовой силы в связанной системе координат.

$$\overline{q} = \begin{pmatrix} (C_{qx} - C_{qx0}) \cdot K_{qx} \\ (C_{qy} - C_{qy0}) \cdot K_{qy} \\ (C_{qz} - C_{qz0}) \cdot K_{qz} \end{pmatrix}$$

2. Считываются коды с каналов АЦП, связанных с ДУС, производится их первичная цифровая фильтрация, производится преобразование масштабов и определяется вектор угловой скорости в связанной системе координат.

$$C^{B}\overline{\omega} = \begin{pmatrix} (C_{\omega x} - C_{\omega x0}) \cdot K_{\omega x} - \omega_{x0} \\ (C_{\omega y} - C_{\omega y0}) \cdot K_{\omega y} - \omega_{y0} \\ (C_{\omega z} - C_{\omega z0}) \cdot K_{\omega z} - \omega_{z0} \end{pmatrix},$$

где $\overline{C}_{\omega 0}$ – вектор кодов при нулевых угловых скоростях.

Так как потенциометры датчиков угловых скоростей имеют отводы от средней точки, коэффициенты K_{ω} имеют разное значение для положительных и отрицательных ω и соответствующих разностей $(C_{\omega} - C_{\omega 0})$.

Вектор кодов \overline{C}_{ω} имеет шумовую составляющую, среднее значение которой имеет дробное значение. Для её компенсации введём вещественный вектор $\overline{\omega}_0$

$$\overline{\omega}_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \omega_{ij}$$

где ω_{i1} , ω_{i2} - означает последнее, предпоследнее и т.д. измеренное значение ω_i при нулевой угловой скорости платформы.

Конструкция использованных датчиков угловой скорости ДУС-М вызывает методическую погрешность от угловых скоростей по перекрёстным осям. При возникновении угловой скорости вокруг оси чувствительности ДУС гироскопический момент скручивает пружину и разворачивает рамку подвеса гироскопа. Угол разворота измеряется потенциометром. Максимальный конструктивно возможный угол разворота рамки $\alpha_{max} = 3,75^{\circ}$.



Рис. 4. Расположение датчиков угловых скоростей и их осей чувствительности на платформе

Значение $\cos \alpha_{\max} = 0,9979$, поэтому погрешность измерения угловой скорости вдоль оси чувствительности (при отсутствии угловых скоростей вокруг других осей) составляет не более 0,2 %. Однако разворот рамки приводит к чувствительности ДУСа к составляющей угловой скорости вдоль оси, проходящей через ось собственного вращения гироскопа в исходном положении. Если считать $\cos \alpha \approx 1$ а $\sin \alpha \approx \alpha$

$$\omega_{x} = \omega_{x}^{*} \pm K_{\alpha\omega_{x}} \cdot \omega_{x}^{*} \cdot \omega_{z} ;$$

$$\omega_{y} = \omega_{y}^{*} \pm K_{\alpha\omega_{y}} \cdot \omega_{y}^{*} \cdot \omega_{z} ;$$

$$\omega_{z} = \omega_{z}^{*} \pm K_{\alpha\omega_{z}} \cdot \omega_{z}^{*} \cdot \omega_{y} ;$$

где знак «±» выбирается в зависимости от направления собственного вращения гироскопа.

$$\left|K_{\alpha\omega}\right| = \frac{\alpha_{\max}}{\omega_{\max}}$$

При частоте питающего напряжения 400 Гц у данных датчиков угловых скоростей $|K_{\alpha\alpha}| = 0,109$ с.

Вычислив предварительно углы разворота гироскопов:

$$\alpha_{x} = K_{\alpha\omega_{x}} \cdot \omega_{x}^{*}$$
$$\alpha_{y} = K_{\alpha\omega_{y}} \cdot \omega_{y}^{*}$$
$$\alpha_{z} = K_{\alpha\omega_{z}} \cdot \omega_{z}^{*},$$

где $\overline{\omega}^*$ – угловые скорости, измеренные датчиками угловых скоростей. Тогда получим выражения для угловых скоростей вокруг осей связанной системы:

$$\omega_{z} = \frac{\omega_{z}^{*} \cdot \left(1 + K_{\alpha \omega z} \cdot \omega_{y}^{*}\right)}{1 - \alpha_{y} \cdot \alpha_{z}}; \quad K_{\alpha \omega x} = -0,109;$$

$$\omega_{x} = \omega_{x}^{*} + \alpha_{x} \cdot \omega_{z}; \quad K_{\alpha \omega y} = -0,109;$$

$$\omega_{y} = \omega_{y}^{*} + \alpha_{y} \cdot \omega_{z}; \quad K_{\alpha \omega z} = 0,109.$$

3. Вычисляется матрица ориентации платформы в абсолютной системе координат, полученная по углам с датчиков отладочного стенда. При данной конструкции стенда и показанном на рис. 5 способе назначения систем координат

$$R_{\partial am} = \begin{pmatrix} C_1 C_2 C_3 - S_1 S_3 & C_1 S_2 & -C_1 C_2 S_3 - S_1 C_3 \\ S_1 C_2 C_3 + C_1 S_3 & S_1 S_2 & -S_1 C_2 S_3 + C_1 C_3 \\ S_2 C_3 & -C_2 & -S_2 S_3 \end{pmatrix}$$

4. По сигналу начальной установки матрице *R_n* ориентации платформы, получаемой по сигналам датчиков угловых скоростей и акселерометров, присваивается начальное значение. Если используется отладочный стенд, то

$$R_n = R_{\partial am}$$
.

При отклонении платформы от исходного положения ДУС и соответствующий алгоритм обработки сигналов ДУС выдают вектор угловой скорости платформы в связанной системе

$$\overline{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T.$$



Рис. 5. Кинематическая схема системы координат и параметры Денавита-Хартенберга отладочного стенда

Для отслеживания текущего положения платформы матрицу R_n необходимо постоянно "доворачивать" с угловой скоростью $\overline{\omega}(t)$.

5. Производится коррекция ошибок интегрирования матрицы *R_n*.

Ошибки определения угловой скорости и численного интегрирования приводят к накоплению ошибок в матрице R_n . С точки зрения обеспечения устойчивости робота, самыми опасными являются ошибки определения вертикали. Для уменьшения этих ошибок используется коррекция матрицы R_n по сигналам акселерометров. Сигналы, снимаемые с акселерометров установленных на платформе и ориентированных осями чувствительности вдоль осей связанной системы, определяют вектор единичной массовой силы \overline{q} . В связанной системе

$$\overline{q}^{ce} = \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix},$$

где q_x , q_y , q_z – компоненты \overline{q} , снимаемые непосредственно с акселерометров. В абсолютной системе:

$$\overline{q}=R\cdot^{c_{\theta}}\overline{q},$$

где *R* – истинная матрица ориентации платформы. При нулевых линейных ускорениях платформы

$$\overline{q} = \overline{g}$$
, или $c^{c}\overline{q} = c^{c}\overline{g}$.

При движении робот раскачивается относительно вертикали. В каждый момент времени вектор q может не быть вертикальным, однако усредненный за большой период времени q_{cp} вертикален. Таким образом, усредняя по времени \overline{q} можно получить вероятное направление вертикали и корректировать матрицу R_n так, чтобы определяемая ей вертикаль совпадала с вертикалью, полученной по \overline{q} .

Коррекция матрицы ориентации по направлению не может производиться по сигналам акселерометров. Для этого можно использовать информацию о положении опорной стопы, которую в первом приближении можно считать достоверной после того, как закончился процесс адаптации (во время постановки) к опорной поверхности с помощью силомоментного датчика. Однако информация о курсовом угле стоп робота также постепенно накапливает ошибку, поэтому для ориентирования в пространстве, прокладывания курса и т.п. необходимо использовать и другие системы очуствления, например систему технического зрения.

Выводы

Предложенные алгоритмы обработки информации с силомоментных датчиков, установленных в стопах робота и с инерциальной навигационной системой, установленной в корпусе робота, являются эффективным средством для построения систем стабилизации и управления роботом. Реализация разработанных алгоритмов на лабораторном образце двуногого шагающего робота подтвердила их работоспособность.

Список литературы

1. Вукобратович М., Стокич ДЩ., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами. М.: Мир, 1989. 194 с.

2. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкевич С.Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978. 398 с.

3. Ковальчук А.К., Яроц В.В., Семёнов С.Е. Автоматизированный расчёт мощности электрогидравлических приводов двуногого шагающего робота // Актуальные проблемы повышения качества современного энергомашиностроения: Тезисы докладов межреспубликанской студенческой научной конференции. –М., 1988. –С. 46.

3.Зенкевич С.Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов / 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 478 с.

4. Ковальчук А.К., Кулаков Д.Б., Семенов С.Е. Математическое описание кинематики и динамики исполнительных механизмов роботов с древовидной кинематической структурой // Известия вузов. Машиностроение. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. № 11. С. 13-25.