

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СТАБИЛИЗАЦИИ АНТРОПОМОРФНОЙ КОНЕЧНОСТИ ПРИ ОПОРЕ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Аннотация: Статья посвящена разработке алгоритма управления центром масс антропоморфной конечности на основе данных от тактильных датчиков.

Ключевые слова: стабилизация антропоморфной конечности, управление центром масс, поверхность второго порядка.

Вступление

Одной из основных задач антропоморфной ходьбы является задача управления движением центра масс антропоморфного робота (или же другой антропоморфной конструкции). Эта задача является хорошо проработанной в случае перемещения по плоской поверхности, а также по кусочно-плоской поверхности (ступенькам) [3].

Задача управления центром масс при антропоморфной ходьбе не решена в случае перемещения по неровной поверхности. Решение этой задачи требует ввода обратной связи, которая бы давала представление о форме опорной поверхности, а также о положении конечности в пространстве относительно опорной поверхности. Для получения необходимой информации целесообразно применение тактильных датчиков, закреплённых на нижней поверхности “стопы” антропоморфной конечности.

Для перехода к более сложной задаче балансировки двуногого шагающего аппарата необходимо решить проблему стабилизации одноопорного (одноногого) аппарата, стоящего на неровной поверхности. Под стабилизацией понимается управление центром масс таким образом, что бы привести аппарат в наиболее устойчивое положение.

Постановка задачи

В качестве одноопорного (одноногого) аппарата выбрана некоторая упрощённая модель антропоморфной конечности.

Описание модели антропоморфной конечности

Сосредоточенная масса m , закреплённая на невесомом жёстком стержне длиной l . Стержень закреплён в точке O посредством двухстепенного шарнира, положение которого характеризуется углами φ – в опорной плоскости, и θ – между стержнем и опорной плоскостью. Опорная плита опирается на n точек с координатами $(x_i; y_i) \quad i = \overline{1, n}$. Внизу плиты расположен тактильный датчик, представляющий из себя матрицу сенсоров с некоторым разрешением, которые реагируют на силу давления в точках соприкосновения плиты и поверхности под ней.

Задачей является приведение модели антропоморфной конечности (рис. 1) в наиболее устойчивое положение путём изменения углов φ и θ наклона стержня (перемещения центра масс объекта) на основе данных о давлении в точках соприкосновения стопы и опорной поверхности [1]. Критерием оптимальности положения центра масс является равномерное распределение тяжести по точкам соприкосновения “стопы” и опорной поверхности. Алгоритм должен быть итеративным. На каждом шаге алгоритма разница в распределении веса по точкам соприкосновения должна уменьшаться.

На каждой итерации поставленная задача подразделяется на следующие подзадачи:

1. анализ распределения значений нормальных реакций во входной матрице;
2. определение условия положения наилучшей устойчивости модели антропоморфной конечности;
3. нахождение углов $\Delta\varphi$ и $\Delta\theta$, на которые необходимо изменить положение подвижного звена.

Необходимо также определить критерий максимально устойчивого положения по достижению которого положение центра масс считается оптимальным.

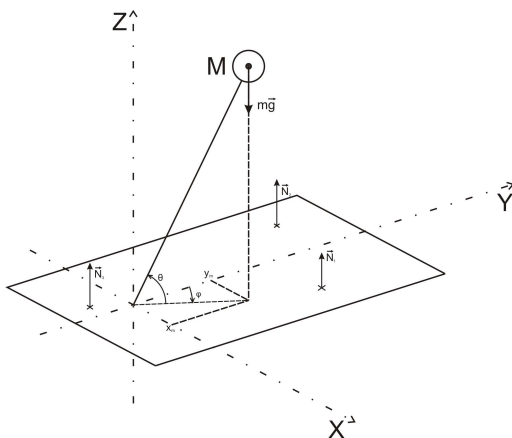


Рис. 1 – Модель антропоморфной конечности с действующими на неё силами

Решение задачи

Алгоритм стабилизации антропоморфной конечности, как указано в постановке задачи, является рекурсивным и предполагает разделение на 3 части:

1. анализ входной матрицы нормальных реакций на основе разбиения области на кластеры;
2. анализ полученных на предыдущем этапе кластеров и определение направления требуемого перемещения центра масс;
3. Вычисление изменения углов φ и θ , необходимые на текущей итерации.

После изменения углов пересматриваются показатели, полученные от тактильного датчика, и управление углами продолжается до тех пор, пока конструкция не придет в наиболее устойчивое положение.

Подготовка исходных данных

Исходными данными для последующего управления является матрица с данными о нормальных реакциях в точках соприкосновения стопы и поверхности, на которую она опирается.

Также в исходные данные входит текущие значения углов φ и θ .

Очевидно, что предварительной обработки требует матрица нормальных реакций.

Неровная поверхность второго порядка, имитирующая неровности поверхности земли, наиболее удобно описывается с помощью карты высот. С помощью среды разработки 3D игр были разработаны ряд карт высот, одна из которых представлена ниже (рис. 2). На основе разработанных поверхностей были проведены эксперименты для получения вида точек соприкосновения стопы и поверхности.

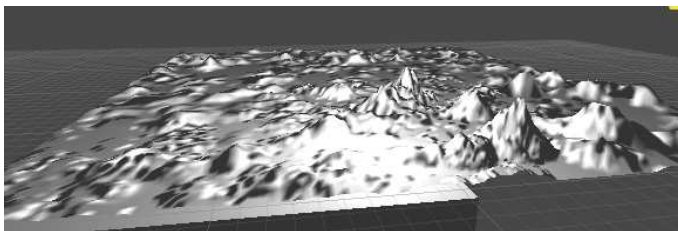


Рис. 2 – Трёхмерное изображение опорной поверхности

Эксперименты показали, что точки соприкосновения распределяются по поверхности неравномерно, имеются скопления точек соприкосновения в отдельных областях “подошвы стопы”. Это естественно вытекает из холмистой структуры поверхности, так как соприкосновение происходит только в области пиков холмов поверхности. Приблизительный вид распределения точек показан на рисунке ниже (рис. 3). Очевидно, что весь массив точек должен быть разделён на отдельные области, которые будут рассматриваться в дальнейшем анализе. Массив точек должен быть разделён на кластеры. При кластеризации точек учитывается расположение точек нормальных реакций на матрице тактильного датчика(координаты x и y), но не учитываются значения усилий в этих точках.

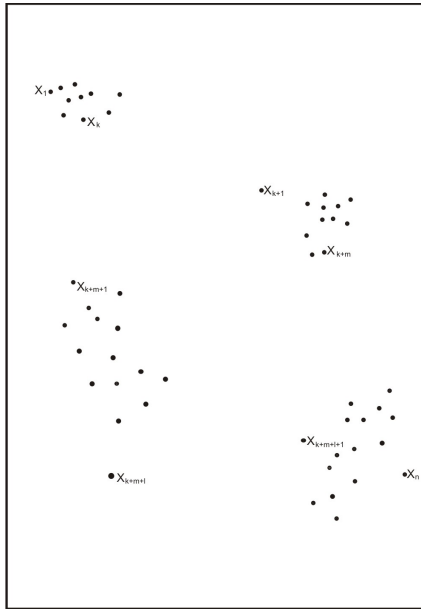


Рис. 3 – Точки соприкосновения нижней плоскости “стопы” с опорной поверхностью

В качестве алгоритма кластеризации избран алгоритм иерархической кластеризации Ланса-Уильямса, изложенного в [2].

Алгоритм состоит из следующих пунктов:

Для $t = 1$ (t – номер итерации):

1. инициализация множества кластеров C_1 :

$$t = 1; C_t = \{\{x_1\}, \dots, \{x_l\}\}; \tag{1}$$

Для всех $t = \overline{2, l}$:

2. отыскание в C_{t-1} два ближайших кластера:

$$(U, V) = \arg \min_{U \neq V} R(U, V); \tag{2}$$

$$R_t = R(U, V); \tag{3}$$

3. изъятие кластеров U и V , добавление объединённого кластера $W = U \cup V$:

$$C_t = C_{t-1} \cup \{W\} \setminus \{U, V\}; \tag{4}$$

4. для всех $S \in C_t$ вычисление расстояния $R(W, S)$;

5. если число кластеров не достигло 3-х и расстояние между $\min R(W, S) \geq 0,125a$, где a – ширина “стопы”, перейти ко второму шагу алгоритма.

В качестве расстояния между кластерами выбрано так называемое расстояние ближнего соседа:

$$R(U \cup V, S) = 0.5R^{\sigma}(U, S) + 0.5R^{\sigma}(V, S) - 0.5 \left| R^{\sigma}(U, S) - R^{\sigma}(V, S) \right|, \quad (5)$$

где $R(W, S) = \min_{w \in W, s \in S} \rho(w, s)$.

Исходный алгоритм кластеризации Ланса-Уильямса был модифицирован для данной задачи. В алгоритм внесено условие прекращения объединения кластеров (5-й пункт).

На выходе получено множество кластеров S_i (рис. 4), с которыми продолжится работа на следующем шаге.

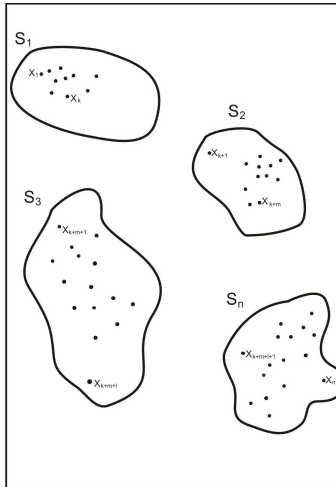


Рис. 4 – Точки соприкосновения нижней плоскости “стопы” с опорной поверхностью разделённые на кластеры

Анализ полученных данных

Критерием наилучшей устойчивости модели антропоморфной стопы является равномерное распределение усилий нормальных реакций между точками соприкосновения стопы и опорной поверхностью.

Моделирование с помощью физического игрового движка показало, что значения усилий нормальных реакций в одном кластере неодинаковы (рис. 5), что вытекает из формы возвышенностей поверхности. Из этого следует, что добиться равномерного распределения нормальных реакций во всех точках всех кластеров невозможно. По этому был выбран критерий равенства максимальных значений усилий в кластерах

$\max_i N, i = 1, \bar{m}$, где m – число кластеров, с определённой точностью ξ .
 Критерий оптимальности положения центра масс:

$$\forall \left| \max_{\omega \in W} N_{\omega} - \max_{s \in S} N_s \right| \leq \xi \text{ для } \forall W \neq S, \quad (6)$$

где W и S – любые 2 кластера из определенных на предыдущем шаге. Если неравенство выполняется – изменение в положении центра масс не требуется, иначе – переходим к следующему шагу.

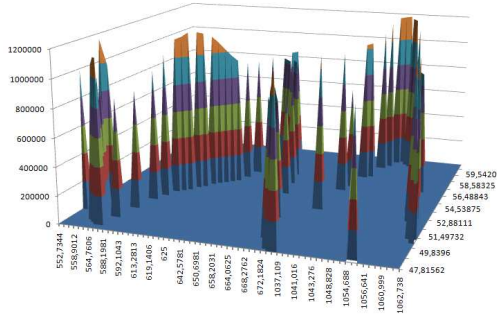


Рис. 5 – График распределения значений усилий нормальных реакций в точках соприкосновения

После того, как точки максимальных значений усилий в кластерах определены, для дальнейшего определения направления перемещения центра масс среди вышеуказанных выбирается точка с минимальным значением усилия.

Из кластеров выбирается следующая точка

$$N_{res} = \min(\max_i N), \quad (7)$$

где N – значения нормальных реакций в i -м кластере, $i = 1, \bar{m}$, m – число кластеров.

Изменения углов

Необходимо отыскать единичный вектор, указывающий направление перемещения центра масс.

$$\vec{V} = \frac{(x_{N_{res}} \vec{i} + y_{N_{res}} \vec{j}) - (x_M \vec{i} + y_M \vec{j})}{\left| (x_{N_{res}} \vec{i} + y_{N_{res}} \vec{j}) - (x_M \vec{i} + y_M \vec{j}) \right|}, \quad (8)$$

где M – точка сосредоточения массы, \vec{V} – единичный вектор, указывающий направление изменений положения центра масс.

Из системы уравнений изменения координат точки M находим угол, на который необходимо повернуть стержень с помощью шаговых двигателей.

$$\begin{aligned}x_m + x_{\bar{v}} &= l \cos(\theta + \Delta\theta) \sin(\varphi + \Delta\varphi); \\y_m + y_{\bar{v}} &= l \cos(\theta + \Delta\theta) \cos(\varphi + \Delta\varphi).\end{aligned}\tag{9}$$

После решения системы уравнений получаем углы $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$. После изменения углов процедура расчёта повторяется.

Выводы

В результате исследования был разработан алгоритм стабилизации, который включает в себя кластеризацию входных точек, определение направления перемещения центра масс и нахождение углов поворота стержня для перемещения центра масс. Для кластеризации был использован модифицированный метод кластеризации Ланса-Уильямса. Был выработан критерий оптимальности положения центра масс как критерий необходимости изменений углов наклона стержня.

Разработанный алгоритм позволяет стабилизировать положение модели антропоморфной конечности управляя положением центра масс. В дальнейшем полученный результат может быть использован для разработки алгоритмов управления равновесием двуногого механизма (робота). Данный алгоритм позволяет не только привести рассматриваемую модель в наиболее устойчивое положение на стабильной поверхности (не изменяющей своё положение со временем), но также для поддержания равновесия на нестабильной поверхности (изменяющая своё положение с течением времени), примером которой может служить поверхность плавучего средства, спущенного на воду.

Литература

1. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы / Вукобратович М. // Москва: “МИР”, 1976 – 544 с.
2. Кластерный анализ / Мандель И. Д. / М.: Финансы и Статистика, 1988 – 176 с.
3. Feedback Control of Dynamic Bipedal Robot Locomotion / Eric R. Westervelt, Jessy W. Grizzle, Christine Chevallereau, Jun Ho Choi, and Benjamin Morris // Taylor & Francis Group, 2007 – 518 с.

Отримано 05.03.2012 р.