

УДК 519.71

СИНХРОНИЗАЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ «ПЕРЬЕВ» НА ПОВЕРХНОСТИ КРЫЛА В ТУРБУЛЕНТНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

К.С. Амелин

Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28
E-mail: konstantinamelin@gmail.com

Н.О. Амелина

Санкт-Петербургский государственный университет
Институт Проблем Машиноведения РАН
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28
Россия, 199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой проспект, 61
E-mail: natalia_amelina@gmail.com

О.Н. Граничин

Санкт-Петербургский государственный университет
Институт Проблем Машиноведения РАН
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28
Россия, 199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой проспект, 61
E-mail: oleg_granichin@mail.ru

Ю.В. Иванский

Санкт-Петербургский государственный университет
Институт Проблем Машиноведения РАН
Россия, 198504, Санкт-Петербург, Университетский пр., 28
Россия, 199178, Санкт-Петербург, В.О., Большой проспект, 61
E-mail: ivanskiy.yuriy@gmail.com

Ключевые слова: мультиагентные системы, сенсорные сети, децентрализованное управление, турбулентность, самолет с «перьями», достижение консенсуса.

Аннотация: Миниатюризация и увеличение производительности вычислительных и исполнительных устройств и сенсоров открывают новые возможности интеллектуального управления сложными мехатронными системами при переходных процессах и в изменяющейся окружающей среде. В статье показано как самоорганизация сложной системы может быть использована для адаптации к изменениям структуры пространства состояний. В качестве примера рассматривается самолет с массивом «перьев» с сенсорами и исполнительными устройствами на поверхности крыла. Цель этой системы состоит в выравнивании возмущающих сил в условиях турбулентности при помощи мультиагентного протокола.

1. Введение

Технологический прорыв привел к ситуации, когда фундаментальные проблемы окружающего мира рассматриваются с точки зрения практических приложений. С уменьшением размера устройств, микро- и макро- среда стали доступны для исследования. Для широкого круга задач имеет смысл рассматривать модели с изменяющейся во времени структурой пространства состояний, вызывающей самоорганизацию внутренней структуры системы за счет коммуникации между структурными элементами в системе.

В последнее десятилетие проблемы взаимодействия в распределенных динамических сетях привлекают все больше внимания исследователей, поскольку оно находит все больше применений в распределенных системах управления электрическими сетями, в многопроцессорных системах, беспроводных, транспортных, производственных сетях, сетях датчиков, координации БПЛА и мобильных роботов и т. д. [1–4].

В [5] мультиагентная система использовалась для выравнивания турбулентного давления на поверхности самолета. Было предложено разместить массив мехатронных пластин («перьев») на поверхности крыла для контроля давления воздуха. В этой статье дается более подробная математическая модель крыла (в то время как [5] в большей степени фокусируется на физической модели выравнивания давления). Описан новый испытательный стенд с пластинами, соединенными по углам.

Статья имеет следующую структуру. Раздел 2. формализует постановку задачи. Алгоритм синхронизации «перьев» самолета предложен в разделе 3. Тестовый стенд рассматривается в разделе 4. Вывод приведен в разделе 5.

2. Стабилизация полета в зоне турбулентности

Предположим, что самолет с полной массой M летит со скоростью $\mathbf{V}(t)$ из-за суммы действующих на него сил $M \frac{d\mathbf{V}(t)}{dt} = \mathbf{F}_e - \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_l$ где силы $\mathbf{F}_e, \mathbf{F}_d, \mathbf{F}_g, \mathbf{F}_l$ — тяга двигателя, сопротивление воздуха сила, сила тяжести и подъемная сила соответственно. Если режим полета является стационарным, все силы уравновешены $\mathbf{F}_e - \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_l = 0$, самолет движется по прямой с постоянной скоростью $\mathbf{V}_0 = \text{col}(V_0, 0, 0)$. Поток ветра над самолетом считается ламинарным и известен для заданной формы корпуса. Это означает, что распределение сил по поверхности корпуса также известно. Когда самолет попадает в турбулентный поток ветра, распределение сил меняется, баланс сил нарушается, полет становится нестационарным и возникает тряска $\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \mathbf{V}_1$, $m \frac{d\mathbf{V}_1}{dt} = \mathbf{F}_1(t)$. Помимо отклонений от заданной траектории из-за силы \mathbf{F}_1 , приложенной к результирующей силовой точке $\mathbf{r}^1(t)$, момент силы $\mathbf{M}_1(t) = [\mathbf{r}^1(t) \times \mathbf{F}_1(t)]$ вызывает нерегулярное вращение самолета вокруг центра масс, изменяя момент импульса $\mathbf{L}_1(t) = [\mathbf{r}^1(t) \times m\mathbf{V}_1(t)]$ согласно закону $\frac{d\mathbf{L}_1(t)}{dt} = \mathbf{M}_1(t)$. Здесь и далее $[\cdot \times \cdot]$ обозначает векторное произведение.

Для уменьшения тряски могут использоваться специальные элементы на поверхности корпуса, подобные перьям птиц. Предположим, что поверхность крыла самолета состоит из N подобных элементов («перьев») a_1, \dots, a_N . Обозначим \mathbf{r}_i вектор из центра масс самолета в центр «пера» a^i . Каждый элемент оснащен датчиком давления (чувствительным к силе резистором), позволяющим измерять силу давления y_i , и привод u_i с двумя сервомеханизмами, позволяющими поворачивать пластину

в двух плоскостях, на *угол наклона* $\alpha_i \in [\alpha^-, \alpha^+]$ в вертикальной плоскости и *угол поворота* $\beta_i \in [\beta^-, \beta^+]$ в горизонтальной плоскости.

Интегральная воздушная сила, действующая на i -ый элемент с площадью S , $\mathbf{d}_i(t) = \mathbf{n}_i(t)C_d(\alpha_i(t), \beta_i(t))S\rho(v_i(t))^2/2$ имеет три компонента, которыми можно управлять с помощью перьев, имеющих три степени свободы (реакция пластины по нормали, два угла α_i и β_i), где $\mathbf{n}_i(t)$ — вектор нормали к i -ой пластине, $C_d(\alpha_i(t), \beta_i(t))$ — аэродинамический коэффициент i -й пластины, определяемый двумя углами $\alpha_i(t), \beta_i(t)$; $v_i(t)$ — величина скорости потока над i -ой пластиной на поверхности самолета в момент t . Сила $\mathbf{d}_i(t)$ имеет три проекции: компонента вдоль оси x определяет сопротивление воздуха, вертикальная компонента определяет подъемную силу, третья — боковая компонента рыскания. Для поворота агента i можно использовать действие микроуправления $u_i(t)$. $\dot{\alpha}_i(t) = u_i^{(1)}(t)$, $\dot{\beta}_i(t) = u_i^{(2)}(t)$. Действие макроуправления $U_i(t)$ для агента i определяется мощностью двигателя самолета.

Предположим, что самолет движется в ламинарном воздушном потоке и в течение некоторого периода времени $[t_0, t_1]$ интегральная воздушная сила, действующая на i -ый элемент («перо») является константой \mathbf{d}_i^0 и все «перья» лежат на поверхности: $\alpha^i = 0$ и $\beta^i = 0$.

Пусть $x_i(t)$ — вектор состояния агента («пера») i . Он состоит из 11 компонентов $x_i^{(j)}(t)$, $j = 1, 2, \dots, 11$: 3 координаты, 3 скорости, 3 поворота и два угла. Предположим, что $y_i(t) = \|\mathbf{d}_i(t)\|$ без ограничения общности. Пусть $z_i(t) = \mathbf{d}_i(t) - \mathbf{d}_i^0$ отклонение интегральной воздушной силы от начального вектора \mathbf{d}_i^0 в ламинарном потоке ветра, действующего на i -ый элемент. Для сил $\mathbf{F}_e, \mathbf{F}_d, \mathbf{F}_g, \mathbf{F}_l$, в ламинарном потоке ветра $\mathbf{F}_e = \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(e,0)} U_i^{(1)} + m_{N+1} U_{N+1}^{(1)}$, $\mathbf{F}_d = \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(d,0)} \mathbf{d}_i^0$, $\mathbf{F}_g = \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(g,0)} g + m_{N+1} g$, $\mathbf{F}_l = \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(l,0)} \mathbf{d}_i^0$, где вводится дополнительный агент $N+1$, расположенный в центре масс с $\mathbf{r}_{N+1} = 0$ and $m_{N+1} = M - \sum_{i \in \mathbb{N}} \theta_i^{(g)}$ и $\theta_i^{(e,0)} = \theta_i^{(g,0)} = m_i$ — масса агента, $U_i^{(1)} = const$ — постоянная мощность двигателя, Коэффициенты $\theta_i^{(d,0)}$ и $\theta_i^{(l,0)}$ зависят от положения и ориентации агента на поверхности, g — гравитационная постоянная. В ламинарном потоке ветра, когда самолет движется вдоль прямой с постоянной скоростью V_0 , динамика агента i описывается дифференциальными уравнениями $\dot{x}_i^{(1)}(t) = V_0$, $t \in [t_0, t_1]$, $\dot{x}_i^{(j)}(t) = 0$, $j = 2, 3, 6, \dots, 11$, $\dot{x}_i^{(4)}(t) = \theta_i^{(e,0)} U_i^{(1)} - \theta_i^{(d,0)} \mathbf{d}_i^0 = 0$, $\dot{x}_i^{(5)}(t) = \theta_i^{(d,0)} \mathbf{d}_i^0 - \theta_i^{(g,0)} g = 0$, $y_i(t) = \|\mathbf{d}_i^0\|$, $u_i(t) = 0$, $U_i^{(1)}(t) = e$, $U_i^{(j)}(t) = 0$, $j = 2, 3$, где постоянная e определяется мощностью двигателя.

В турбулентном потоке «перья» начинают подниматься и поворачиваться. Отклонения сил $z_i(t)$ вызваны небольшими возмущениями ламинарного потока при поворотах пластин и турбулентным потоком вокруг них. Обозначим \mathbb{N}^i множество соседей пера i и предположим, что каждое перо i получает информацию о $\mathbf{d}_j(t)$ и углах $\alpha_j(t), \beta_j(t)$ for $j \in \{i\} \cup \mathbb{N}^i$. В результате синхронизации сил агенты получают примерно равные отклонения сил и образуют кластеры на поверхности самолета.

Предположим, что относительно оси движения самолета крылья имеют значительный размер в направлении, перпендикулярном движению и малый в продольном направлении, при этом размер корпуса самолета в перпендикулярном направлении тоже мал. При этих предположениях среди возмущающих сил $z_i(t)$ действующих на всю поверхность самолета, только вертикальные и боковые проекции отклонений сил важны для задачи уменьшения тряски. Для возмущающей силы $\mathbf{F}_1(t)$ имеем $\mathbf{F}_1(t) = \sum_{i \in \mathbb{N}} z_i(t)$. Для выравнивания отклоняющихся сил $z_i(t)$ можно использовать действия микроуправления $u_i(t)$, если изменение турбулентного потока ветра происходит до-

статочно медленно, и до момента t_2 он существенно не изменяется. Предположим, коррекция возможна в течение небольшого временного интервала τ : $t_1 + \tau < t_2$. Получаем, что $\mathbf{F}_1(t) = N\mathbf{z}^1 = const$ в течение временного интервала $[t_1 + \tau, t_2]$. Следовательно, для момента вращения имеем $\mathbf{M}_1(t) = \sum_{i \in \mathbb{N}} [\mathbf{r}_i \times z_i(t)] = N[\sum_{i \in \mathbb{N}} \mathbf{r}_i \times \mathbf{z}^1]$. Для однородного распределения перьев на симметричной корпусе $\sum_{i=1}^n \mathbf{r}^i = 0$, и $\mathbf{M}_1 = 0$. Таким образом, основной фактор, связанный с тряской, скомпенсирован выравниванием сил, действующих на разные перья. После выравнивания отклонений сил, вызванных турбулентным потоком ветра, $\mathbf{F}_1 = const$, поток над корпусом становится почти ламинарным, пока не изменится ветер. Из-за малой и постоянной силы \mathbf{F}_1 траектория плоскости медленно изменяется в одном направлении и может быть скомпенсирована с помощью макроуправления U_i . Точнее, на временном интервале $[t_1 + \tau, t_2]$ можно использовать следующую модель динамики агента $\dot{x}_i(t) = f_i(x_i(t), \theta_i(t), u_i(t), U_i(t))$, $y_i(t) = \|\mathbf{d}_i(t)\|$. где параметры модели $\theta_i(t)$ определяются силой \mathbf{F}_1 , массой, положением, ориентацией и начальными параметрами движения в ламинарном потоке ветра.

3. Консенсусный алгоритм

Требуется синхронизировать агентов по выходам $z_i(t)$. При возможности напрямую управлять скоростями \dot{z}_i , можно было бы использовать протокол $\dot{z}_i(t) = \gamma \sum_{j \in \mathbb{N}_i} b_{ij}(z_j - z_i)$. Здесь $B = (b_{ij})$ — неотрицательная взвешенная матрица смежности графа связи, $\mathbb{N}_i = \{j : b_{ij} \neq 0\}$ — множество соседних узлов для узла i , а $\gamma > 0$ — коэффициент усиления. Будем считать, что коммуникация является двунаправленной ($b_{ij} = b_{ji}$) и граф связи является связным, что гарантирует экспоненциальную сходимость к консенсусу [7, 8]. В случае неориентированного графа протокол является алгоритмом градиентного спуска, примененным к функции «энергии» $Q(\mathbf{Z}) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N b_{ij} |z_j - z_i|^2$. Однако протокол не может быть напрямую использован, поскольку фактическими входами управления являются скорости $\dot{\alpha}_i$ и $\dot{\beta}_i$. Заметим, что $\frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial \alpha_i} = -y_i \sin(\alpha_i)$, $\frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial \alpha_i} = y_i \cos(\alpha_i) \cos(\beta_i)$, $\frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial \beta_i} = 0$, $\frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial \beta_i} = -y_i \sin(\alpha_i) \sin(\beta_i)$, $\frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial y_i} = \cos(\alpha_i)$, $\frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial y_i} = \sin(\alpha_i) \cos(\beta_i)$. Рассмотрим алгоритм управления, эквивалентный упомянутому выше, и следовательно, экспоненциально сходящийся к консенсусу:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_i &= - \left(\gamma \frac{\partial Q}{\partial z_i^{(1)}} + \frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial y_i} \dot{y}_i \right) \left(\frac{\partial z_i^{(1)}}{\partial \alpha_i} \right)^{-1} = - \frac{\gamma}{y_i \sin(\alpha_i)} \sum_{j \in \mathbb{N}_i} b_{i,j} (z_j^{(1)} - z_i^{(1)}) + \frac{\dot{y}_i}{y_i} \cot(\alpha_i), \\ \dot{\beta}_i &= - \left(\gamma \frac{\partial Q}{\partial z_i^{(2)}} + \frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial \alpha_i} \dot{\alpha}_i + \frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial y_i} \dot{y}_i \right) \left(\frac{\partial z_i^{(2)}}{\partial \beta_i} \right)^{-1} = \frac{\dot{y}_i}{y_i} \frac{\cot \beta_i}{(\sin \alpha_i)^2} - \frac{\gamma}{y_i \sin(\alpha_i) \sin(\beta_i)} \sum_{j \in \mathbb{N}_i} b_{i,j} \times \\ &\times \left((z_j^{(2)} - z_i^{(2)}) - \cot \alpha_i \cos \beta_i (z_j^{(1)} - z_i^{(1)}) \right), \text{ также } \dot{\alpha}_i = \dot{\beta}_i = 0, \text{ если } y_i = 0. \end{aligned}$$

Кроме того, можно оценить время, необходимое для достижения приближенного консенсуса $|Q(\mathbf{Z}(t))| \leq \varepsilon$. Оценка зависит от ε , γ , значения $\mathbf{Z}(t_1+)$ и характеристик графа. Точная формулировка приведена в [6],

4. Тестовый стенд

Для имитационных экспериментов используется летательный аппарат (планер), крылья которого оснащены $N = 100$ мехатронными пластинами («перьями») для

выравнивания отклонений воздушных сил на разных участках крыла. Каждое «перо» оснащено датчиком давления (чувствительным к силе резистором). Пластины имеют квадратную форму и соединены с соседними пластинами в углах. Приводы (линейные сервомеханизмы) устанавливаются в точках соединения пластин так, что каждое «перо» соединяется с двумя приводами в противоположных углах (за исключением пластин, расположенных на краю крыла), и каждый привод соединяется с четырьмя углами пластин. Наклон и поворот каждого пера осуществляется путем изменения хода соответствующих сервомеханизмов.

Управление углами наклона и поворота перьев и сбор данных обеспечивается микроконтроллерами Arduino Mega 2560 R3. Временной шаг системы составляет $h = 0.03$ с. Максимальное запаздывание исполнительного механизма составляет 0.006 с, частота датчиков — 100 Гц. Все данные с микроконтроллеров Arduino хранятся на главном компьютере для профилирования и визуализации. В экспериментах каждое «перо» выступает в роли агента и взаимодействует с четырьмя смежными агентами.

5. Заключение

В работе рассматривается задача выравнивания давления ветра, действующего на различные элементы поверхности самолета в турбулентном воздушном потоке. Предлагаемое решение заключается в использовании большого числа «перьев» на крыле самолета, которые можно поворачивать, изменяя углы наклона и поворота для выравнивания отклонений сил, действующих на них при изменившемся ветре от сил, действующих на соответствующие участки крыла в ламинарном потоке. Для этой цели применяется мультиагентный алгоритм управления массивом исполнительных механизмов на основе обратной связи, который использует только данные об отклонении давления воздушного потока на перо и об отклонениях на соседних перьях. Как показано в разделе 3., можно оценить время синхронизации, исходя из ряда предположений, что являются темой нашего будущего исследования.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (16-09-00057).

Список литературы

1. Olfati-Saber R., Murray R. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2004. Vol. 49, No. 9. P. 1520-1533.
2. Ren W., Beard R., Atkins E. Information consensus in multivehicle cooperative control // *Control Systems. IEEE*. 2007. Vol. 27, No. 2. P. 71-82.
3. *Cooperative Control of Multi-Agent Systems: Optimal and Adaptive Design Approaches* / Ed. by Lewis F., Zhang H., Hengster-Movric K., Das A. New York: Springer, 2014. 307 p.
4. Shen H., Li N., Griffiths H., Rojas S. Tracking control of a small unmanned air vehicle with airflow awareness // *American Control Conference (ACC)*. 2017. P. 4153-4158.
5. Granichin O., Khantuleva T., Granichina O. Local voting protocol for the adaptation of airplane's "feathers" in a turbulence flow // *American Control Conference (ACC)*. 2017. P. 5684-5689.
6. Граничин О.Н., Хантулева Т.А. Адаптация элементов крыла («перьев») самолета в турбулентном потоке с помощью мультиагентного протокола // *Автоматика и телемеханика*. 2017. № 10. С. 168-188.
7. Ren W., Beard R. *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control: theory and applications*. London: Springer, 2008. 319 p.
8. Agaev R., Chebotarev P. On the spectra of nonsymmetric laplacian matrices // *Linear Algebra and its Applications*. 2005. Vol. 399. P. 157-168.