ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 658.51(07)

КООРДИНАЦИЯ В ИЕРАРХИЧЕСКИХ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ АБСТРАКЦИЙ

П.А. Угаров
e–mail: Pavel@rts.susu.ac.ru

Южно–Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Статья поступила 28 февраля 2004 г.

Введение

Многие современные сложные технические объекты сочетают в себе как дискретные, так и непрерывные компоненты. Для их моделирования используются гибридные автоматы, позволяющие работать с системами, пространство состояний которых включает в себя как подмножества евклидового метрического пространства, так и конечные множества значений для дискретных переменных состояния. Большинство современных методов управления гибридными системами основано на вычислении множеств достижимости различного рода в гибридном пространстве состояния. Возможность применения этих методов существенно зависит от сложности и порядка модели объекта. Поэтому во многих случаях для гибридных объектов эффективным является использование иерархических способов управления, основанных на декомпозиции исходной задачи. В иерархических системах выполняется агрегирование информации, передаваемой на верхний уровень управления [1]. Элемент верхнего уровня (координатор) интересует не действительное текущее состояние всех элементов нижнего уровня, а некоторые показатели их работы на определенном интервале времени, поэтому решение на верхнем уровне принимается с использованием некоторых упрощенных моделей, отражающих поведение элементов нижнего уровня. Эти модели должны описывать не только сам объект управления, но и используемые локальные регуляторы. В данной работе будем рассматривать двухуровневую иерархическую систему, которая имеет один элемент верхнего уровня (координирующую систему) и два элемента нижнего уровня. Эта структура соответствует системе управления ультразвуковой технологической установкой, в которой локальные регуляторы осуществляют управление системой подачи материала (СПМ) и ультразвуковым генератором (УЗГ). В [2] выделены группы критериев и приведены алгоритмы координации, используемые для входа в установившийся режим и для работы в этом режиме. Здесь мы рассмотрим координацию в переходном режиме, когда состояние системы переводится в предопределенную область пространства состояний, в которой возможно применение алгоритмов [2].

1. Дискретные абстракции элементов нижнего уровня

Использование абстракций различного рода находит широкое применение в современной теории гибридных систем управления. Однако в большинстве случаев вводимые абстракции являются всего лишь упрощенными моделями объекта управления и никоим образом не учитывают ни цели управления, ни имеющиеся регуляторы [3]. В работе [4] рассматривается управление непрерывными и гибридными объектами с помощью дискретных абстракций, основанных на концепции «поведения». Под поведениями подразумеваются последовательности входных и выходных символов. К преимуществам поведенческих абстракций относятся лучшая точность по сравнению с абстракциями, основанными на прямой дискретизации пространства состояний, а также значительная гибкость, так как моделирование на поведенческом уровне позволяет регулировать точность дискретной абстракции (аппроксимации) исходного объекта, варьируя длину строк запоминаемых входных и выходных символов.

Каждая дискретная абстракция элемента нижнего уровня должна описывать работу некоторого гибридного объекта управления (агрегата) совместно с определенным множеством локальных регуляторов. В соответствии с решениями задач синтеза наименее ограничивающих стабилизирующих регуляторов в пространстве состояний каждого агрегата выделяются максимальные управляемые инварианты, которые определенным образом соотносятся с выходными символами. Под управлениями (входными символами) понимаются законы управления (регуляторы), которые используются для перехода из одного инварианта в другой. Вмешательство координатора происходит в моменты времени, соответствует смене состояния дискретной абстракции какого–либо элемента нижнего уровня. Дискретную абстракцию, получаемую путем составления цепочек «поведений», определим как кортеж вида $\mathbf{A} = \langle X_d, R, \mathbf{F}, \mathbf{W}, \mathbf{C}, \mathbf{R}, \mathbf{T}, \mathbf{B} \rangle$.

$R = \left\{ r^{(1)}, r^{(2)}, \ldots, r^{(N_R)} \right\}$ — конечное множество законов управления (регуляторов), которые может использовать система управления нижнего уровня. Эти регуляторы робастны в том смысле, что они обеспечивают заданное верхним уровнем качество управления при условии, что на нижнем уровне помехи и неопределенности принадлежат определенным множествам, используемым при решении локальных теоретико–игровых задач управления.

$\mathbf{F} = \left\{ \mathrm{F}^{(1)}, \mathrm{F}^{(2)}, \ldots, \mathrm{F}^{(N_\mathrm{F})} \right\}$ — допустимые множества в гибридном пространстве состояний агрегата, $\mathrm{F}^{(i)} \subseteq Q \times X$. Эти множества строятся в соответствии с типами задач, для решения которых будет использоваться дискретная абстракция. Например, они могут задавать области, через которые должно проходить состояние системы в определенные моменты времени, связанные с безопасностью ограничения и т. д.

$\mathbf{W} = \left\{ W^{(1)}, W^{(2)}, \ldots, W^{(N_\mathrm{F})} \right\}$ — максимальные управляемые инварианты агрегата, соответствующие допустимым множествам $\mathbf{F}$. Каждое множество $W^{(i)}$ строится в ходе решения теоретико–игровой задачи синтеза наименее ограничивающего регулятора, обеспечивающего удержание состояния системы в $\mathrm{F}^{(i)}$. Если в момент времени t_{init} гибридное состояние агрегата принадлежит определенному инварианту, то есть $(q(t_{init}), x(t_{init})) \in W^{(i)}$, то существует такое управление, при котором $\forall t \geq t_{init}$ гарантируется выполнение включения $(q(t), x(t)) \in \mathrm{F}^{(i)}$. Данная гарантия выполняется при условии, что помехи и неопределенности принадлежат множествам, которые использовались при решении теоретико–игровой задачи синтеза управления.

$X_d = \left\{ x_d^{(1)}, x_d^{(2)}, \ldots, x_d^{(N_X)} \right\}$ — конечное множество состояний дискретной абстракции. Состояние абстракции $\mathbf{A}$ в момент времени t_k определяется следующим образом:

$$x_d(t_k) = \begin{cases} [W(t_0)], & k = 0, \\ \left([W(t_0), \ldots, W(t_k)],\ [r(t_0), \ldots, r(t_{k-1})]\right), & k = 1, \ldots, l, \\ \left([W(t_{k-l}), \ldots, W(t_k)],\ [r(t_{k-l}), \ldots, r(t_{k-1})]\right), & k > l. \end{cases}$$

Каждый момент времени t_i соответствует окончанию решения некоторой задачи, поставленной перед элементом нижнего уровня координатором, например, моменту входа агрегата в определенный целевой инвариант. В этот момент на верхний уровень передается информационный сигнал, в котором содержится текущее (обновленное) состояние соответствующей дискретной абстракции. На основании этого сигнала, а также информации о том, в каком состоянии пребывают абстракции остальных элементов нижнего уровня, система управления верхнего уровня принимает решение по выбору следующего регулятора, который будет использоваться данным элементом нижнего уровня. Конечность множества X_d следует из того, что $\mathbf{W}$, R и I конечны. В качестве состояний дискретной абстракции далее используются только те строки, которые может генерировать исходная система.

$\mathbf{C} \subseteq X_d \times X_d$ — переходное отношение между состояниями дискретной абстракции (далее также обозначается как $\to$). Если переход из i–го состояния в j–е возможен, то $\left(x_d^{(i)}, x_d^{(j)}\right) \in \mathbf{C}$ $\left(x_d^{(i)} \to x_d^{(j)}\right)$. В противном случае $\left(x_d^{(i)}, x_d^{(j)}\right) \notin \mathbf{C}$.

$\mathbf{R} = \left(R_{ij}\right)$ — матрица, определяющая множества регуляторов, с помощью которых выполняется переход из i–го состояния дискретной абстракции в j–е состояние: $R_{ij} \subseteq R$; $\left(x_d^{(i)}, x_d^{(j)}\right) \in \mathbf{C} \Rightarrow R_{ij} \neq \varnothing$, $\left(x_d^{(i)}, x_d^{(j)}\right) \notin \mathbf{C} \Rightarrow R_{ij} = \varnothing$.

$\mathbf{T} = \left(T_{ij}\right)$ — матрица, определяющая время перехода из одного состояния в другое: $T_{ij} \subseteq \left(0, \infty\right)$. Множества T_{ij} вычисляются в результате решения дифференциальных гибридных игр, поэтому гарантируется, что действительное время перехода $x_d^{(i)} \to x_d^{(j)}$ будет принадлежать соответствующему множеству T_{ij} независимо от действий дискретных и непрерывных помех и неопределенностей, которые были учтены при решении соответствующей теоретико–игровой задачи управления.

$\mathbf{B} = \left(B_{ij}\right)$ — матрица, определяющая множества в пространстве состояний агрегата, которым гарантированно принадлежит состояние при переходе из i–го состояния дискретной абстракции в j–е при условии использования регуляторов $\mathbf{R}$.

Множество $T = \left\{t_0, t_1, ...\right\}$ включает все моменты времени, в которые происходит смена состояния дискретной абстракции элемента нижнего уровня. Множество всех функций, задающих отображение $T \to R_d \times \mathbf{W}$, обозначим как $\left(R_d \times \mathbf{W}\right)^T$. Поведением элемента нижнего уровня B_G будем считать некоторое подмножество данного множества, совместимое с действительной гибридной моделью агрегата и используемыми локальными регуляторами. Таким образом, $B_G \subseteq \left(R_d \times \mathbf{W}\right)^T$. Ограничение поведения дискретной абстракции элемента нижнего уровня определяется следующим образом:

$$B_G^k = \left\{ b^k \in \left(R, \mathbf{W}\right)^{T_k} \middle| \exists b^{k+} \in \left(R, \mathbf{W}\right)^{T_{k+}} : \left[b^k, b^{k+} \right] \in B_G \right\}.$$

Дискретные абстракции строятся для каждого элемента нижнего уровня. Например, для первого элемента (СПМ + САУ СПМ) определяются три локальных регулятора $r^{(i)} \in \left\{r^{(1)}, r^{(2)}, r^{(3)}\right\}$. Здесь $r^{(1)}$ — наименее ограничивающий стабилизирующий регулятор. При работе этого регулятора состояние системы удерживается в определенном максимальном управляемом инварианте $W^{(i)} \subseteq F^{(i)}$. Так как этот режим является наименее ограничивающим, при его использовании может выполняться оптимизация собственной эффективности агрегата. $r^{(2)}, r^{(3)}$ — переходные регуляторы, используемые для перевода состояния системы из одного инварианта в другой (на всем интервале движения гарантируется включение гибридного состояния системы в определенное множество B_{ij}, соответствующее переходу из i–го состояния абстракции в j–е состояние). $r^{(2)}$ используется для движения в направлении увеличения значения переменной состояния x_1, а $r^{(3)}$ используется для движения в направлении уменьшения значения x_1. Далее определяются допустимые множества, инварианты и все остальные компоненты абстракции. Итоговая абстракция, имеющая 22 состояния, представлена на рис. Для состояний $x_d^{(1)}, ..., x_d^{(8)}$ в прямоугольниках приведен диапазон значений переменной состояния

x_1, определяющий соответствующий инвариант. Для остальных состояний используется запись вида «$i\ j\ s$», где $i,\ j \in \{1, \ldots, N_F\}$ — номера предшествующего и текущего инвариантов, $s \in \{+, -\}$ — регулятор, который использовался для перехода («$+$» соответствует $r^{(2)}$, «$-$» соответствует $r^{(3)}$).

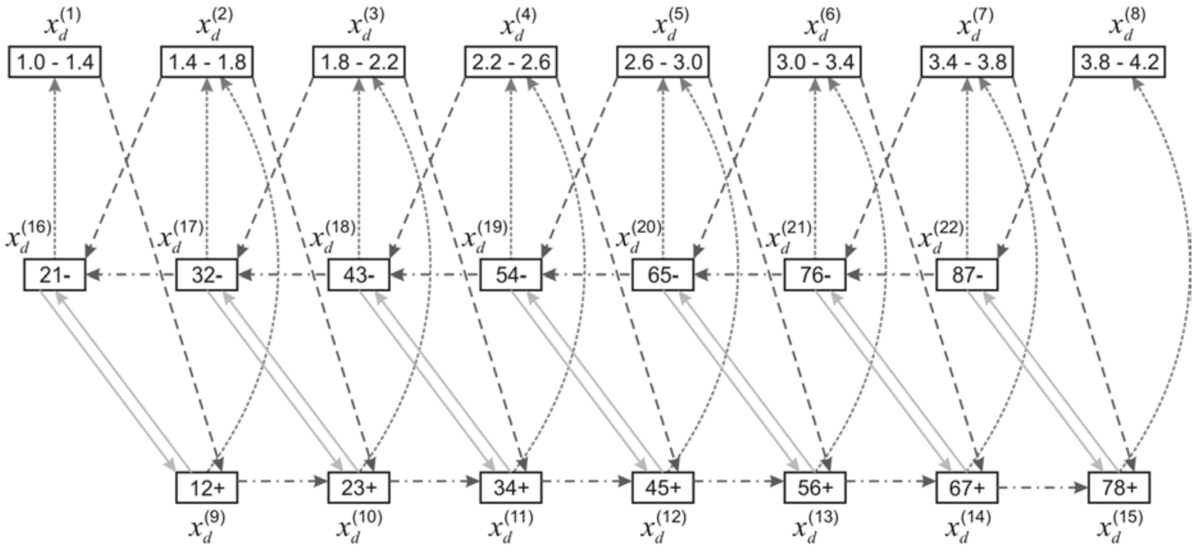

Рис. 1. Дискретная абстракция элемента нижнего уровня 1 (СПМ + САУ СПМ).

2. Координация по дискретным абстракциям

С помощью дискретных абстракций можно анализировать траектории в пространстве показателей элементов нижнего уровня, а не в пространстве состояний объекта управления. Например, если у каждого из двух элементов нижнего уровня имеется единственный показатель, при решении задачи координации достаточно рассматривать двумерное пространство, в то время как общее количество непрерывных и дискретных переменных состояния СПМ и УЗГ достаточно велико. При этом на нижнем уровне будет реализовываться управление по полным моделям агрегатов, что обеспечивает необходимое качество решения локальных задач.

Глобальная целевая функция определяется как $\mathbf{F}_0\left(F_1, F_2, d^0\right)$, где F_1, F_2 — показатели качества элементов нижнего уровня, $d^0 = \left(d_1^0, \ldots, d_M^0\right)' \in D^0$ — вектор помех и неопределенностей верхнего уровня. Задачей управления в переходном режиме является перевод агрегатов в такие подмножества пространств состояний, из которых в дальнейшем будет осуществляться вход в установившийся режим. Действия координатора должны быть направлены на улучшение некоторых свойств этих переходов, значимых с точки зрения верхнего уровня иерархической системы управления.

Если для абстракции элемента нижнего уровня $\mathbf{A}^1$ известны начальное $x_{1d}^{(i_0)}$ и конечное $x_{1d}^{(i_{f1})}$ состояния, то существует множество траекторий Ξ^1, соединяющих эти состояния:

$$\Xi^1 = \left\{ \xi_1 = \left\{ x_{1d}^{(i_0)}, x_{1d}^{(i_1)}, \ldots, x_{1d}^{(i_{f1})} \right\} \middle| \begin{array}{l} \forall k \in \{0, \ldots, f1\} : x_{1d}^{(i_k)} \in X_d^1, \\ \forall k \in \{0, \ldots, f1-1\} : \left(x_{1d}^{(i_k)}, x_{1d}^{(i_{k+1})} \right) \in \mathbf{C}^1. \end{array} \right\}$$

Выбор элементов множеств Ξ^1 и Ξ^2 выполняется координатором в соотвествии с целями верхнего уровня иерархической системы. Траектории ξ_1 соответствует последовательность интервалов времени $\Omega_1 = \left\langle \omega_1^{(i_0)}, \omega_1^{(i_1)}, ..., \omega_1^{(i_{f1-1})} \right\rangle$, $\Omega_1 \in T^1_{i_0, i_1} \times T^1_{i_1, i_2} \times ... \times T^1_{i_{f1-1}, i_{f1}}$. Данная последовательность неоднородна в том смысле, что одни ее элементы соответствуют переходам с управляемым временем (то есть работе в режиме стабилизации), а другие — переходам с неуправляемым временем. Обозначим первые элементы как Ω_{u1} и Ω_{u2}, а вторые как Ω_{d1} и Ω_{d2}. Таким образом, с точки зрения верхнего уровня управляемыми переменными являются ξ_1, ξ_2, Ω_{u1}, Ω_{u2}. Они передаются на нижний уровень в составе координирующих сигналов. В переходном режиме действия координатора направлены на максимизацию двух показателей качества верхнего уровня: Ψ_1 (быстродействие — приоритетный показатель) и Ψ_2 (точность слежения).

$\Psi_1(\xi_1, \xi_2, \Omega_1, \Omega_2) = -\mathrm{T_S}$; $\mathrm{T_S} = \max\left(\mathrm{T}_1(\xi_1, \Omega_1), \mathrm{T}_2(\xi_2, \Omega_2)\right)$ — время перехода всей системы в целевое множество. Здесь $\mathrm{T}_1(\xi_1, \Omega_1) \in [0, \infty)$ — время перехода дискретной абстракции $\mathbf{A}^1$ в целевой инвариант $W_1^{(i_{f1})} \subseteq \mathrm{F}_1^{(i_{f1})}$, T_2 — время перехода дискретной абстракции $\mathbf{A}^2$. Гарантия Ψ_1^g определяется следующим образом: $\Psi_1^g(\xi_1, \xi_2, \Omega_{u1}, \Omega_{u2}) = \min\limits_{\Omega_{d1}, \Omega_{d2}} \Psi_1(\xi_1, \xi_2, \Omega_{u1}, \Omega_{u2}, \Omega_{d1}, \Omega_{d2})$.

$\Psi_2(\xi_1, \xi_2, \Omega_1, \Omega_2)$ — показатель близости к оптимальному значению глобальной целевой функции $\mathbf{F}_0$ на интервале времени $[0, \mathrm{T_S}]$. Будем рассматривать ось времени τ как последовательность интервалов оси реального времени I_n, то есть $\tau = \{I_n\}$, $n \in \{1, ..., N_\mathrm{T}\}$. $I_n = [\tau_n, \tau'_n]$ — замкнутые интервалы для всех n, $\forall n: \tau_n \le \tau'_n$, $\forall n > 1: \tau_n = \tau'_{n-1}$, $\forall n: I_n \subseteq [0, \mathrm{T_S}]$. Кроме того, $\mathrm{T_S} = \sum\limits_{n=1}^{N_\mathrm{T}} (\tau'_n - \tau_n)$. Гарантированное значение глобальной целевой функции $\mathbf{F}_0$ рассчитывается отдельно для каждого интервала времени I_n, в течение которого состояния дискретных абстракций элементов нижнего уровня не меняются, то есть выполняется переход из одного состояния в другое. Ψ_2 рассчитывается как среднее значение, определенное на основании интервальных гарантий для $\mathbf{F}_0$:

$$\Psi_2(\xi_1, \xi_2, \Omega_1, \Omega_2) = \frac{1}{\mathrm{T_S}} \sum_{n=1}^{N_\mathrm{T}} (\tau'_n - \tau_n) \left[\min_{F_1 \in \mathrm{B}_n^1, F_2 \in \mathrm{B}_n^2, d^0 \in D^0} \mathbf{F}_0(F_1, F_2, d^0) - \mathbf{F}_0(F_1^*, F_2^*, d^0_{opt}) \right]^2 .$$

Здесь $\mathrm{B}_n^1, \mathrm{B}_n^2$ — множества значений показателей качества элементов нижнего уровня на интервале времени I_n. Эти множества определяются тем, какие переходы дискретных абстракций выполняются на траекторий интервале I_n. Также определим гарантию показателя для определенного выбора и управляемых параметров: $\Psi_2^g(\xi_1, \xi_2, \Omega_{u1}, \Omega_{u2}) = \min\limits_{\Omega_{d1}, \Omega_{d2}} \Psi_2$.

Рассмотрим общую схему алгоритма координации. Начальные состояния дискретных абстракций известны, так что задача верхнего уровня сводится к выбору таких траекторий абстракций элементов нижнего уровня ξ_1, ξ_2 и их параметров Ω_{u1}, Ω_{u2}, которые максимизируют гарантии Ψ_1^g и Ψ_2^g. Процесс координации является «сквозным», то есть координирующая система всегда определяет полные траектории абстракций, но элементы нижнего уровня выполняют лишь первый шаг этих траекторий, а затем обращаются к координатору, который рассчитывает новые траектории. Каждая локальная система управления работает в том или ином режиме до тех пор, пока не будут выполнены определенные условия перехода в новое состояние дискретной абстракции. При использовании стабилизирующего регулятора $r^{(1)}$ таким условием является истечение времени, определенного координатором, а при использовании переходных регуляторов $r^{(2)}$ и $r^{(3)}$ — вход в определенные инварианты пространства состояний. Таким образом, элементы нижнего уровня значительную часть времени работают независимо.

По окончании решения своих локальных задач элементы нижнего уровня сообщают об этом координатору с помощью информационных сигналов $\gamma_1 = \left\langle x_{1d}^{(i_k)} \right\rangle$ и $\gamma_2 = \left\langle x_{2d}^{(j_k)} \right\rangle$, а в ответ получают координирующие сигналы $\beta_1^* = \left\langle \xi_1^*, \Omega_{u1}^* \right\rangle$ и $\beta_2^* = \left\langle \xi_2^*, \Omega_{u2}^* \right\rangle$, определяющие новые траектории дискретных абстракций и длительности переходов с управляемым временем. Оба элемента нижнего уровня обращаются к координатору асинхронно. Координатор при необходимости может прервать работу одного элемента нижнего уровня в результате обращения на верхний уровень другого элемента нижнего уровня.

Заключение

Рассмотренные дискретные поведенческие абстракции элементов нижнего уровня позволяют реализовывать эффективные алгоритмы координации при иерархическом управлении сложными гибридными объектами. Агрегированные модели (абстракции) строятся с учетом имеющихся в наличии локальных регуляторов, поэтому они содержат информацию о гарантированных значениях показателей качества нижнего уровня. Использование гарантий при обмене информацией между элементами иерархической структуры позволяет локализовать действие помех и неопределенностей, специфичных для того или иного элемента. Алгоритм координации с определением полных траекторий обеспечивает переход системы в заданное целевое множество даже тогда, когда координатор не вмешивается в работу нижнего уровня после завершения каждого перехода дискретных абстракций, так как начальные траектории гарантируют вход в целевое множество за определенное время. Таким образом, предложенная иерархическая схема управления обладает определенной робастностью по отношению как ко внешим помехам и неопределенносям, так и ко внутренним нарушениям структурных связей.

Список литературы

1. Алиев Р.А., Либерзон М.И. Методы и алгоритмы координации в промышленных системах управления. М.: Радио и связь, 1987. 208 с.
2. Тележкин В.Ф., Угаров П.А. Синтез многоуровневых систем управления с гарантированным качеством // В кн.: Механика и процессы управления. Труды XXXII Уральского семинара. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2002. С. 340—345.
3. Alur R., Henzinger T., Lafferriere G., Pappas G. Discrete abstractions of hybrid systems // Proceedings of the IEEE, 2000. V. 88, № 7. P. 971—984.
4. Raisch J. Discrete Abstractions of Continuous Systems — an Input/Output Point of View // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. Special issue on Discrete Event Models of Continuous Systems, 2000. V. 6, № 1. P. 6—29.