

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СВЯЗАННЫМ ДВИЖЕНИЕМ ДВУРУКОГО МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА

А.Г. Лесков, И.А. Калеватых

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: agleskov@rambler.ru; kalevatykh@gmail.com

Приведены результаты экспериментальных исследований двух алгоритмов управления движением двуруких роботов при наличии механической связи между руками. Первый алгоритм основан на задании общей для обеих рук плановой траектория движения. Во втором алгоритме плановая траектория задана только для одной из рук — ведущей, вторая рука движется в податливом режиме по сигналам шестикомпонентного датчика сил и моментов.

Ключевые слова: двурукие манипуляционные роботы, контактные операции, податливое движение, согласованное управление, управление по положению, управление по силе.

EXPERIMENTAL STUDIES OF ALGORITHMS FOR CONTROL OF COORDINATED MOTION OF TWO-MANIPULATOR COOPERATIVE SYSTEM

A.G. Leskov, I.A. Kalevatykh

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

e-mail: agleskov@rambler.ru; kalevatykh@gmail.com

Results of experimental studies of two algorithms for control of motion of a two-manipulator cooperative system are considered for the case of mechanical connection between the manipulators. The first algorithm is based on a common planned trajectory given for both manipulators. In the second algorithm, the planned trajectory is set only for one of the manipulators — the “leader”. Motion of the second manipulator is carried out in a compliant mode by signals from the six-component force/moment sensor.

Keywords: two-manipulator cooperative system, interaction tasks, compliant motion, cooperative control, position control force control.

Создание двуруких манипуляционных роботов (МР) — это новое, быстро развивающееся направление в робототехнике. Такие роботы имеют целый ряд преимуществ по сравнению с однорукими МР: большие объем рабочей зоны и грузоподъемность, более высокие динамические характеристики.

Для двуруких роботов характерными являются операции, при которых руки МР (обозначим их как МР1 и МР2) образуют замкнутую кинематическую цепь. К ним относятся относятся в том числе операции переноса и кантования объектов двумя руками. При этом наличие у МР двух рук позволяет манипулировать неуравновешенными объектами, захватывать и переносить крупногабаритные предметы, а также объекты, не имеющие специального механического интерфейса для захвата.

Вопросы управления двурукими манипуляторами привлекают значительное внимание исследователей, разработано несколько подходов к управлению такими роботами при связанном движении.

Так, в работах [1, 2] эта задача решается кинематически, путем пересчета траектории захваченного объекта. В работах [3, 4] приведен алгоритм управления по принципу “ведущий-ведомый”, когда задается траектория движения только одной руки (ведущей). Движение ведомой руки осуществляется по сигналам датчика сил и моментов, с которыми ведомый манипулятор воздействует на объект. При этом ведомый манипулятор воздействует на захваченный объект так, чтобы обеспечить его удержание двумя руками, но компенсировать внутренние силы реакции. Условия удержания объекта с учетом сил трения и условий равновесия захваченного объекта рассматриваются, например, в работе [5].

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований двух представленных ранее алгоритмов согласованного управления двурукими роботами при связанном движении — согласованного управления и управления по принципу “ведущий-ведомый”.

1. Согласованное управление. Необходимым условием выполнения операций двумя руками является согласование законов движения, что нетрудно обеспечить, введя в рассмотрение систему координат (СК), жестко связанную с объектом (в дальнейшем — общая СК). При этом управление системой “двурукий МР–объект” строится по принятой для манипуляционных роботов схеме, включающей в себя планирование траектории движения системы координат, связанной с рабочим органом МР. В случае двурукого МР планируется траектория СК, связанной с захваченным объектом (общей СК), с последующим решением обратных кинематических задач (ОКЗ) для каждой руки [1, 2]. Результатом решения ОКЗ являются плановые координаты исполнительной системы управления (ИСУ) рук.

Общая структурная схема системы управления (СУ) двурукого МР приведена на рис. 1, из нее следует, что тактическая СУ (ТСУ) двурукого МР осуществляет планирование траектории общей СК и ее пересчет в траектории рук, которые поступают на вход ТСУ МР1 и МР2.

На рис. 1 введены следующие обозначения: $\tilde{x}_{FW}^{(W)}$ — плановые декартовы координаты начала общей (FW) СК двурукого МР в мировой (W) СК; $\tilde{x}_{FL}^{(FW)}$, $\tilde{x}_{FR}^{(FW)}$ — плановые координаты начала инструментальных СК рук (FL, FR) относительно СК FW, заданные в СК FW; $\tilde{x}_{FL}^{(W)}$, $\tilde{x}_{FR}^{(W)}$ — плановые координаты начала СК FL, FR в СК W; $\tilde{x}_{FL}^{(BL)}$, $\tilde{x}_{FR}^{(BR)}$ — плановые координаты рук в собственных базовых СК (BL и BR); \tilde{q}_L, \tilde{q}_R — плановые координаты шарниров.

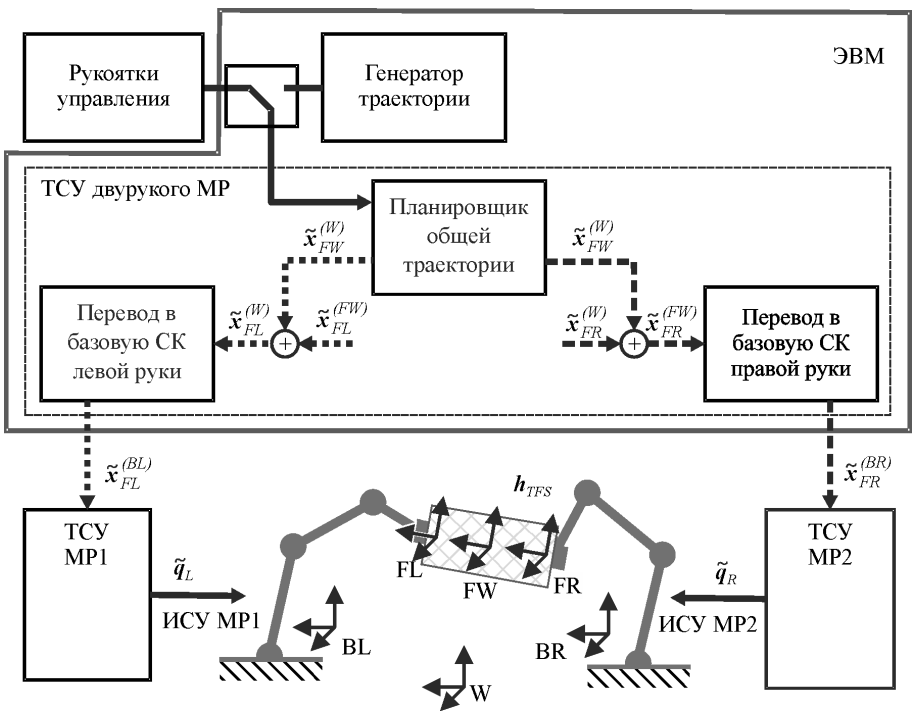


Рис. 1. Структура системы управления двуручного МР

Соотношения для расчета параметров траектории левой руки имеют вид

$$\begin{cases} \tau_{FL,BL} = \tau_{FL,FW} \tau_{FW,W} \tau_{W,BL}; \\ l_{FL,BL}^{(BL)} = \tau_{W,BL}^T \left(\tau_{FW,W}^T l_{FW,FL}^{(FW)} + l_{W,FW}^{(W)} \right) + l_{BL,W}^{(BL)}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\tau_{FL,FW}$ — матрица перехода от общей СК двуручного робота к инструментальной СК левой руки; $\tau_{FW,W}$ — матрица перехода от мировой СК к рабочей СК двуручного робота (определяется траекторией движения объекта); $\tau_{W,BL}$ — матрица перехода от мировой СК к базовой СК левой руки; $l_{FW,FL}^{(FW)}$ — смещение начала координат инструментальной СК левой руки относительно рабочей СК двуручного МР; $l_{W,FW}^{(W)}$ — смещение начала координат рабочей СК двуручного МР относительно мировой СК (определяется траекторией движения объекта); $l_{BL,W}^{(BL)}$ — смещение начала координат базовой СК левой руки относительно мировой СК.

Элементы матриц $\tau_{FL,FW}$, $\tau_{W,BL}$ и векторов $l_{FW,FL}^{(FW)}$, $l_{BL,W}^{(BL)}$ — постоянные величины.

Описанный подход удобно применять при выполнении операций, в которых не требуется контролировать возникающие в процессе движения МР силы и моменты реакций, например, при манипулировании объектами, допускающими деформацию. Этот подход прост в реализации и не требует использования дополнительного оборудования, такого как СМД.

Однако по отношению к целому ряду операций применение этого метода либо ограничено, либо недопустимо. Отсутствие контроля сил и моментов реакций может привести к значительным нагрузкам на руки и переносимый объект, что вызовет повреждение и разрушение объекта, либо срабатывание систем защиты рук робота от перегрузки и, как следствие, приведет к невозможности выполнения операции.

2. Управление по методу “ведущий-ведомый”. Реакцию связи рук можно уменьшить, перейдя к управлению по методу “ведущий-ведомый” [3, 4]. В этом методе одна из рук (ведущая) движется по плановой траектории, а другая (ведомая) — в направлении минимизации сил и моментов реакции.

В этом случае для ведомой руки устанавливается соотношение, связывающее приведенные к общему центру (центру податливости) силы и моменты реакции связи и скорости, которые необходимо развить для их компенсации. Это соотношение имеет вид:

$$\begin{pmatrix} v_c^* \\ \omega_c^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_t & C_c \\ C_c^T & C_o \end{pmatrix} \cdot h_i^c, \quad (2)$$

где v_c^*, ω_c^* — требуемые угловая и линейная скорости корректирующего движения; C — аналог матрицы податливости (6×6), связывающий силы и моменты со скоростями; h_i^c — приведенный к инструментальной СК ведомой руки вектор внутренних (6×1) сил и моментов, которые обусловлены внутренними напряжениями, возникающими в объекте манипулирования.

Значение h_i^c можно получить следующим образом:

$$h_i^c = h_{TFS}^c - L_s \cdot h_e^c, \quad (3)$$

где h_{TFS}^c — приведенный вектор сил и моментов, полученных от силомоментного датчика ведомой руки; h_e^c — приведенный вектор внешних сил и моментов, действующих на объект (в простейшем случае можно учитывать только силу тяжести); $L_s = \text{diag} \{ \lambda \}$ — матрица распределения нагрузки, определяющая какую часть вектора внешних сил должен компенсировать ведомый манипулятор.

Применение в системе управления МР соотношений (2) и (3) обеспечивает компенсацию внутренних сил и моментов реакции и уверенное удержание объекта.

Структура системы управления “ведущий-ведомый” двурукого МР приведена на рис. 2.

3. Экспериментальные исследования алгоритмов. В целях исследования свойств рассмотренных алгоритмов выполнена серия экспериментов по управлению двуруким МР при связанном движении на базе полунатурного функционально-моделирующего стенда (ФМС) [6, 7]. В качестве рук двурукого робота выступали два шестистепенных

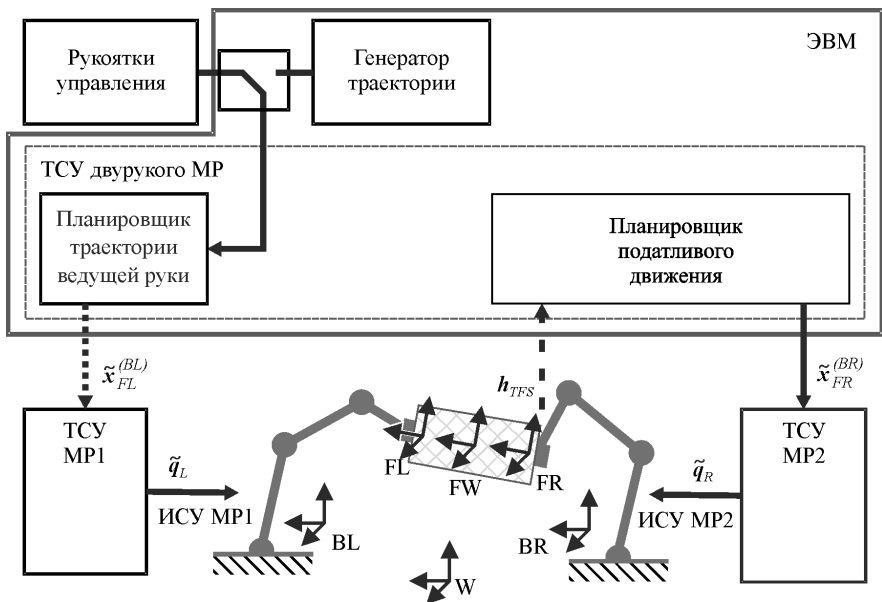


Рис. 2. Структура системы управления двуручного МР в режиме “ведущий-ведомый”:

h_{TFS} — силы и моменты, поступающие от СМД, установленного на запястье ведомой руки

промышленных робота (ПР) Kawasaki FS20N, каждый робот оснащен собственной стойкой управления (D-контроллер), реализующей функции ТСУ. Для управления ПР от ЭВМ был разработан шлюз: сервер, размещенный в памяти контроллера, и клиент на ЭВМ, которые обмениваются данными по сети Ethernet по протоколу TCP/IP. На запястье одного из роботов был установлен шестикомпонентный силомоментный датчик (СМД) фирмы Schunk. Внешний вид экспериментального стенда представлен на рис. 3.

Далее приведены результаты проведенных экспериментов по управлению двуруким МР.

Эксперимент 1. Исследование движения одного ПР в свободном пространстве. На графике (рис. 4) показаны плановая траектория движения рабочей точки ПР по одной из координат (координата x), реальная траектория, точки которой получены от ТСУ ПР, и измеренная ошибка.

Видно, что МР обрабатывает плановую траекторию. Однако при этом наблюдается ошибка позиционирования, зависящая от скорости движения МР.

Эксперимент 2. Исследование согласованного движения (первый алгоритм), двух рук МР в свободном пространстве. Плановая траектория движения общей СК, связанной с виртуальным объектом, и реальные траектории каждой руки приведены на рис. 5. Оси на плановой траектории показывают плановую ориентацию в данный момент

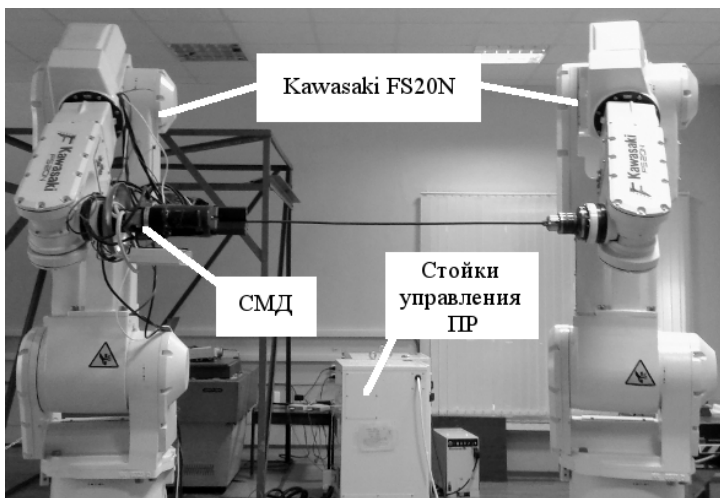


Рис. 3. Экспериментальный стенд “двуркий робот”

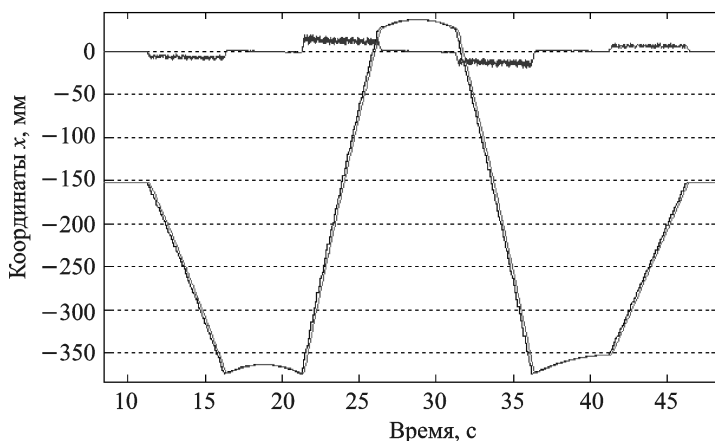


Рис. 4. Плановая и реальная (светлее) траектории движения, ошибка (сверху) при независимом движении ПР в свободном пространстве

времени. Штриховыми линиями связаны точки траекторий, соответствующие одному и тому же моменту времени.

На рисунке видна разница между траекториями движения МР1 и МР2 в абсолютном пространстве, что естественно в силу свойств алгоритма.

Эксперимент 3. *Исследование относительной ошибки, возникающей при согласованном движении двух рук.* Как и в эксперименте 2, руки двигались так, как будто они захватили виртуальный объект. Однако инструментальные СК рук были сдвинуты относительно их базовых СК таким образом, что совпадали перед началом движения. Плановые и реальные траектории каждой руки приведены на рис. 6. Ступенчатый вид плановых траекторий объясняется дискретностью поступления точек от планировщика общего движения в ТСУ каждой

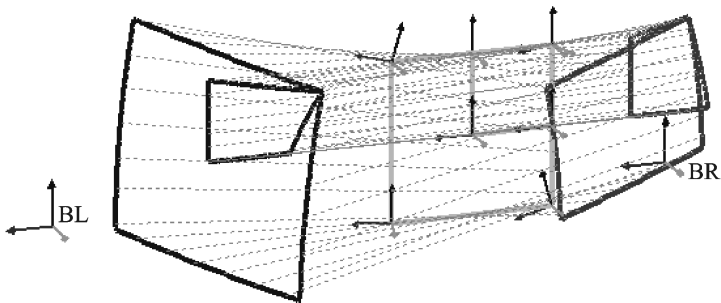


Рис. 5. Траектории общей СК (в центре) и инструментальных СК левой и правой рук двуручного МР

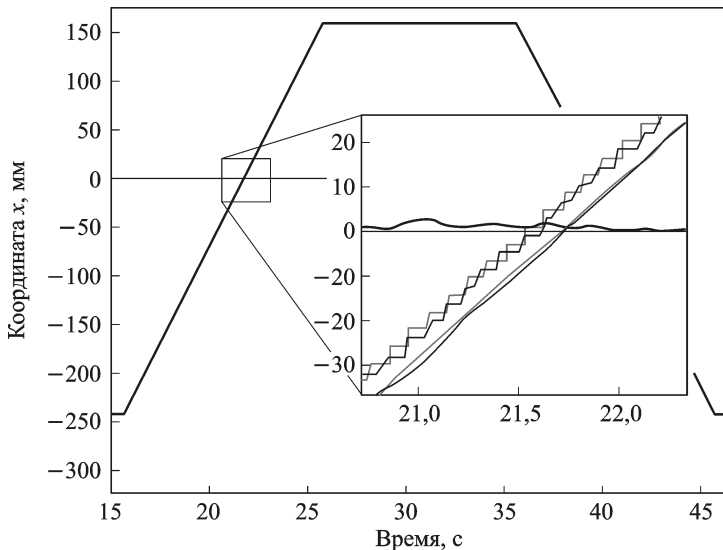


Рис. 6. Заданные (ступенчатые) и реальные траектории движения левой и правой рук в мировой СК, относительная ошибка при движении в связанном режиме с виртуальным объектом

руки, а ошибка отработки каждой руки плановой траектории связана прежде всего с особенностями алгоритма аппроксимации траектории ТСУ ПР Kawasaki, который вносит постоянную задержку. Отметим, что имеет место относительная ошибка позиционирования рук, но она много меньше абсолютной ошибки позиционирования каждой руки относительно плановой траектории. Эксперимент показал, что при применении первого алгоритма возможно повышение относительной точности позиционирования рук по сравнению с абсолютной точностью позиционирования каждой руки отдельно.

Эксперимент 4. Исследование сил и моментов реакции, возникающих при согласованном движении двух рук. Руки МР во время эксперимента жестко удерживали гибкую металлическую трубку и двигались поперек ее оси. Как и в эксперименте 3, инструментальные СК рук были сдвинуты таким образом, что совпадали перед началом

движения. Возникающие в процессе движения силы и моменты реакции регистрировались СМД, установленным на запястье одной из рук. Зарегистрированные процессы приведены на рис. 7. Из графиков следует, что возникают значительные силы и моменты реакции связи, несмотря на то, что плановые траектории рук совпадают.

Эксперимент 5. *Исследование сил и моментов реакции, возникающих при управлении по принципу “ведущий-ведомый”* (второй алгоритм). Руки МР удерживали гибкую металлическую трубку и двигались по той же траектории, что и в эксперименте 4. На рис. 8 приведены зарегистрированные процессы. Верхний график — это траектории ведущей и ведомой рук. Видно, что силы и моменты реакции связи уменьшились по сравнению с согласованным движением (эксперимент 4), однако, траектория ведущей руки (а следовательно, и удерживаемого объекта) отличается от желаемой.

Эксперимент 6. *Исследование применимости алгоритма “ведущий-ведомый” при повышении жесткости удерживаемого объекта.* Руки МР жестко удерживали гибкую металлическую трубку так же, как в эксперименте 5, но движение осуществлялось не поперек, а вдоль ее продольной оси. Данный случай соответствует существенному увеличению жесткости связи между манипуляторами по сравнению с экспериментом 5.

При таком движении не удалось подобрать коэффициенты матрицы податливости (2) так, чтобы система оставалась устойчивой. На рис. 9 и 10 приведены случаи возникновения автоколебаний и потери устойчивости при связанном движении по схеме “ведущий-ведомый”. В этом эксперименте в целях ограничения сил и моментов реакции обеспечивалось проскальзывание захваченного стержня в схвате одного из роботов. На графике видна характерная прямоугольная форма сигналов силы трения.

Проведенная серия экспериментов выявила особенности двух алгоритмов управления связанным движением двурукого МР — согласованное управление (управление общей СК) и управление в режиме “ведущий-ведомый”.

Первый алгоритм удобно применять при выполнении операций, в которых не требуется контролировать возникающие в процессе движения МР силы и моменты реакций, например, при манипуляциях с объектами, допускающими деформацию. При этом обеспечивается достаточно высокая точность слежения за общей траекторией. Особенностью этого алгоритма является возможность повышения относительной точности позиционирования рук по сравнению с абсолютной точностью позиционирования каждой руки относительно плановой траектории.

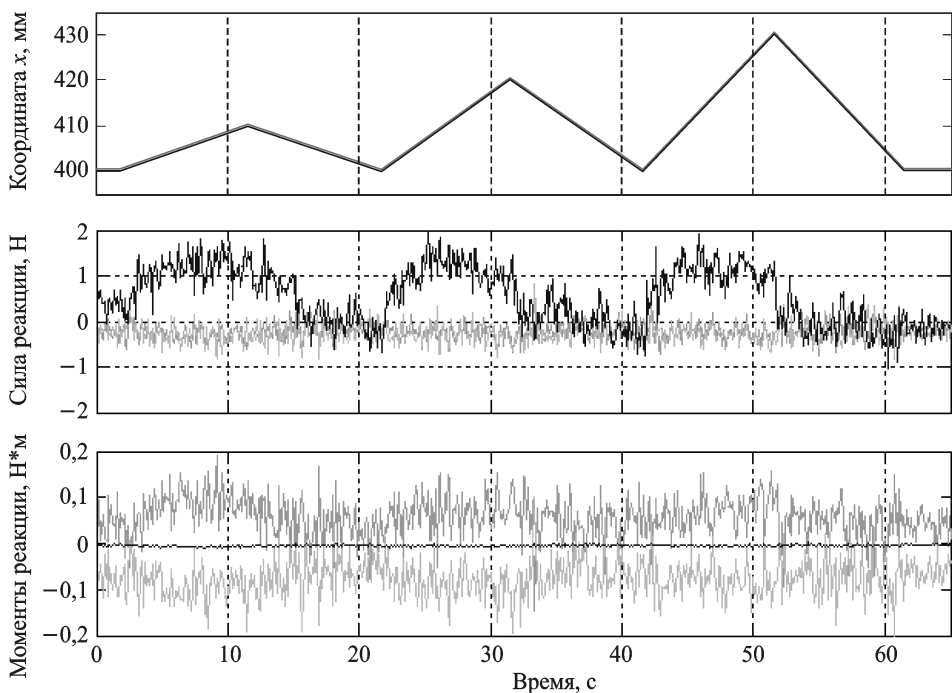


Рис. 7. Реальные координаты рук (почти сливаются) и силы и моменты реакции при связанном движении

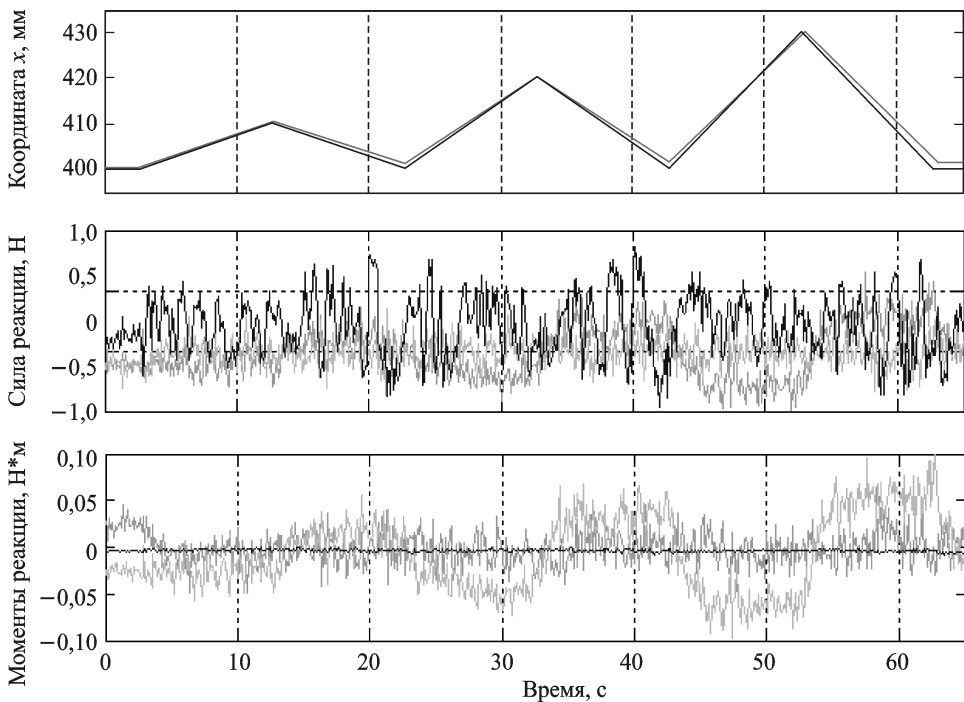


Рис. 8. Реальные координаты рук (ведомая — темнее) и силы и моменты реакции при связанном движении

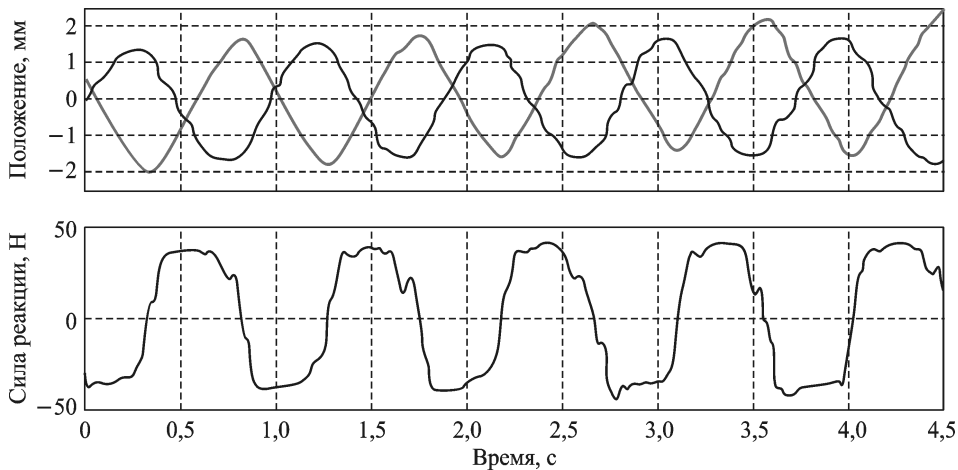


Рис. 9. Автоколебания при управлении по схеме “ведущий-ведомый”. Вверху – управляющий сигнал (светлее) и реальное положение ведомой руки (темнее). Снизу – сила реакции

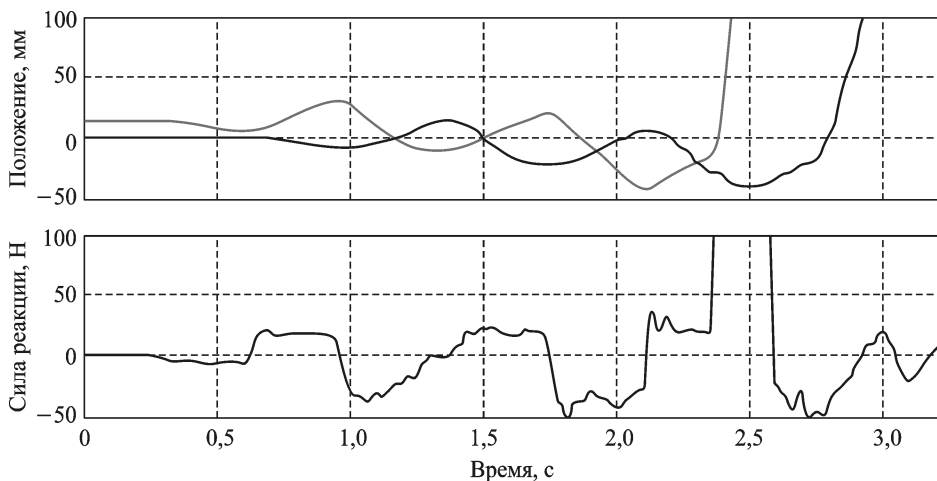


Рис. 10. Потеря устойчивости при управлении по схеме “ведущий-ведомый”

Второй алгоритм позволяет уменьшить силы и моменты реакции связей. Однако возможности алгоритма ограничены в случае жесткой связи между руками (например при манипулировании недеформируемым объектом). Динамика относительного движения рабочих органов рук и запаздывание в каналах управления могут привести к возникновению автоколебаний и потере устойчивости.

В этой связи рациональным представляется применение комбинированных алгоритмов управления, сочетающих возможности каждого алгоритма: высокую точность относительного движения алгоритма общей СК и уменьшение сил и моментов реакции связей при управлении по алгоритму “ведущий-ведомый”. Разработка и исследование подобных комбинированных алгоритмов составляет предмет дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chiacchio P., Chiaverini S., Siciliano B. Direct and inverse kinematics for coordinated motion tasks of a two-manipulator system // ASME J. Dyn. Syst. Meas. Contr. 118, 691–697 (1996).
2. Сассавале F., Chiacchio P., Chiaverini S. Task-Space regulation of cooperative manipulators, Automatica 36, 879–887 (2000).
3. Nakano E., Ozaki S., Ishida T., Kato I. Cooperational control of the anthropomorphic manipulator 'MELARM', Proc. 4th Int. Symp. Ind. Robots (Tokyo 1974). – P. 251–260.
4. Luh J. Y. S., Zheng Y. F. Constrained relations between two coordinated industrial robots for motion control // Int. J. Robot. Res. 6, 60–70 (1987).
5. Челпанов И. Б., Колпашников С. Н. Схваты промышленных роботов. – Л.: Машиностроение. 1989. – 287 с.
6. Illarionov V. V., Korshunov S. V., Leskov A. G., Leskova S. M., Shumov A. V., Zimin A. M. Using Integrated assembly of Virtual and Real Robot System with Remote Access for Practical Training // Innovations 2009: World Innovations in Engineering Education and Research / Editors W. Aung et al. – INEER, Arlington, VA 22205, USA, 2009. – P. 99–108.
7. Лесков А. Г., Илларионов В. В. Математическое и полунатурное моделирование операций космических манипуляционных роботов // Тезисы докл. 8-й Междунар. науч.-практич. конф. “Пилотируемые полеты в космос”. – Звездный городок, 2009. – С. 70–71.

Статья поступила в редакцию 25.06.2012