

УДК 681.5

О. Поляков

Доцент, канд. техн. наук

М. Колесова

Севастопольський національний
технічний університет,
м. Севастополь

П. Штанько

Доцент, канд. техн. наук,
Запорізький національний
технічний університет,
м. Запоріжжя

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ РУХОМ РОБОЧОГО ОРГАНА МАНІПУЛЯТОРА ЗА ОПТИМАЛЬНИМИ ТРАЄКТОРІЯМИ

Розв'язана задача адаптивного керування маніпулятором кінцевих ефекторних рухів по траєкторії, оптимізованих за критеріями мінімальної роботи і мінімальної зміни крутних моментів у рухомих з'єднаннях. При розв'язанні оберненої задачі кінематики використано критерій мінімального дискомфорту. Отримані результати ілюстровані прикладами. Показано, що закони керування мають істотні відмінності за різних стратегій і критеріїв якості руху об'єкта.

маніпулятор, траєкторія, адаптивне керування

Метою керування рухом маніпулятора маніпуляційного робота при реалізації заданого технологічного процесу є або переведення робочого органа в певне положення, або відстеження ним бажаної траєкторії в робочій зоні [1]. Через кінематичну надмірність, властиву більшості маніпуляторів, ці задачі мають множину розв'язків, і вибір одного з них завжди пов'язаний з врахуванням певних критеріїв. Деякі критерії дають змогу вибрати єдину, з множини можливих, траєкторію, що з'єднує довільну початкову точку робочої зони з кінцевою. Інші потрібні для вибору конфігурацій маніпулятора при русі робочого органа по бажаній траєкторії і, таким чином, дають можливість отримувати однозначні розв'язки зворотної задачі кінематики в довільний момент часу. Крім цього, закони керування двигунами також повинні задовольняти критерії якості, які визначають стратегію керування. Слід зазначити, що деякі критерії можуть бути й суперечливими. Так, наприклад, переміщення робочого органа від точки до точки по заданій траєкторії не завжди оптимальне з погляду максимальної швидкодії або мінімальних витрат енергії тощо.

Розв'язанню задач керування рухом маніпуляторів присвячено багато праць, в яких використовуються підходи, що ґрунтуються на різних критеріях якості. Ідеї, висловлені в деяких з них, визначили нинішній стан робототехніки в цілому й керування маніпуляторами, зокрема. Багато відомих фірм-виробників разом з роботами поставляють замовникові й програмне забезпечення, в якому ті або інші питання стратегії керування приймаються автоматично. Однак, універсального підходу до розв'язання цієї проблеми дотепер не вироблено. Крім цього, знайти її однозначний розв'язок принципово неможливо, якщо розглядати маніпулятор як аналог руки людини.

Метою цієї статті є розроблення стратегії керування, яка дає можливість отримати рухи ланок маніпулятора подібні до вільних (ненавмисних) рухів елементів руки людини, що характеризуються сталістю кінематичних і динамічних характеристик відповідно експериментальних спостережень.

Вважатимемо, що бажана траєкторія, вздовж якої відстежується рух, завжди може бути подана скінченною

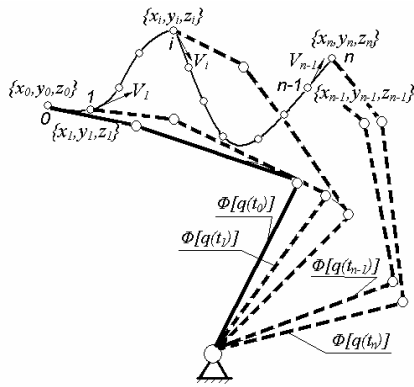


Рис. 1. Гранічні умови й граничні конфігурації маніпулятора в проміжних точках траєкторії

множиною n , у загальному випадку криволінійних, ділянок, на яких рух здійснюється за принципом позиціонування робочого органа в кінцевому положенні незалежно від форми реалізованої траєкторії. При цьому природною є вимога погодженості граничних умов руху й конфігурацій маніпулятора в проміжних точках траєкторії (рис. 1).

Якщо траєкторії робочого органа й конфігурації оптимальні на кожній з проміжних ділянок, то «склеєна» з них кінцева траєкторія, відповідно до принципу оптимальності Белмана, також оптимальна [2]. Отже, розроблення стратегії керування маніпулятором при русі робочого органа від точки до точки фактично дає можливість отримати стратегію керування при русі робочого органа по заданій траєкторії в цілому. За потреби реалізовані траєкторії можуть бути згладжені певним методом, наприклад, викладеним у [3].

Нехай потрібно за допомогою маніпулятора з обертовими кінематичними парами, що має антропоморфну структуру, здійснити відносно швидко переміщення об'єкта з початкової точки робочої зони — у кінцеву. Тоді один з можливих варіантів стратегії керування може бути обраний на підставі аналізу даних про характер і властивості рухів кінцівок людини при виконанні подібних операцій, які вважатимемо оптимальними.

Кінематика й динаміка таких рухів приблизно може бути описана на основі критерію мінімальної зміни обертових моментів τ_i у з'єднаннях ланок:

$$K_1 = \frac{1}{2} \int_0^{t_k} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d\tau_i}{dt} \right)^2 dt \rightarrow \min, \quad (n - \text{кількість ступенів вільності маніпулятора}) [4].$$

Однак, як показано в [5], енергетичні витрати при цьому не є мінімально можливими. Наприклад, при використанні критерію мінімальної

$$\text{сумарної роботи } K_2 = \int_{t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^n \tau_i \frac{d\varphi_i}{dt} dt \rightarrow \min, \quad (\varphi_i - \text{узагальнені координати маніпулятора})$$

вони значно менші.

Для однозначного визначення конфігурацій антропоморфного маніпулятора з надлишковою рухомістю можна використати обґрунтований з біомеханічної точки зору

критерій мінімального дискомфорту [6]:

$$K_3 = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^m [\gamma_i \Delta \varphi_i^{norm} + G \times QU_i + G \times QL_i] \rightarrow \min,$$

$$\text{де } QU_i = \left[0.5 \sin \left(\frac{5.0(\varphi_i^U - \varphi_i)}{\varphi_i^U - \varphi_i^L} + 1.571 \right) + 1 \right]^{100};$$

$$QL_i = \left[0.5 \sin \left(\frac{5.0(\varphi_i - \varphi_i^L)}{\varphi_i^U - \varphi_i^L} + 1.571 \right) + 1 \right]^{100};$$

$$\Delta \varphi_i^{norm} = \frac{\varphi_i - \varphi_i^N}{\varphi_i^U - \varphi_i^L}; \quad \varphi_i, \varphi_i^N, \varphi_i^U, \varphi_i^L - \text{поточне, нейтральне, найбільше й найменше значення узагальненої координати, відповідно; } \gamma_i - \text{вагові коефіцієнти; } G - \text{деяка константа.}$$

Критерій K_3 забороняє маніпулятору приймати «дискомфортні» конфігурації, що характеризуються близькістю хоча б однієї з узагальнених координат до свого граничного значення. У цьому випадку виключаються граничні сингулярні конфігурації маніпулятора [7]. Очевидно, при плануванні траєкторії робочого органа подібним чином можуть бути прийняті до уваги й інші критерії.

У праці [5] були отримані розв'язки задачі планування траєкторій руху плоского дволанкового маніпулятора з використанням критеріїв K_1 і K_2 . Їхній аналіз дає можливість стверджувати, що отримувані траєкторії в цілому характеризуються наявністю властивостей, які спостерігаються при вільних рухах руки людини в горизонтальній площині, тобто так звану кінематичною і динамічною інваріантністю. Ці терміни широко використовуються в закордонній літературі з фізіології й біомеханіки кінцівок людини (див., наприклад, [8], [9] та ін.) і трактуються в такий спосіб.

1. Під кінематичною інваріантністю розуміють однотипність траєкторій (траєкторії близькі до прямих ліній або гладких кривих з малою кривиною), симетрична дзвоноподібна форма графіка тангенціальної швидкості, а також наближена лінійна залежність між значеннями кутів повороту плеча й передпліччя при вільних (незалежних) рухах довільної точки кисті з початкового положення в кінцеве в області досяжності.

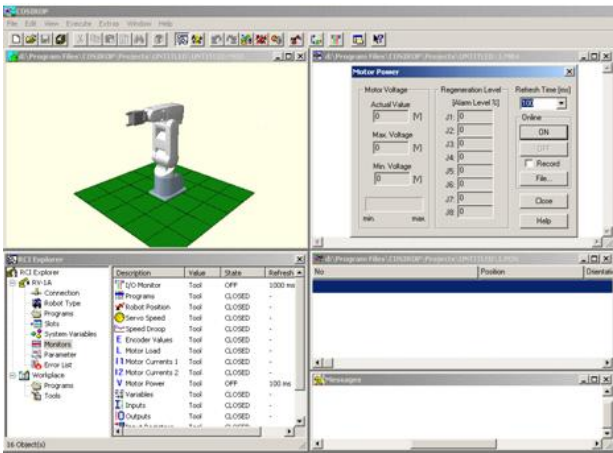
2. Під динамічною інваріантністю, яку називають також «лінійною синергією», розуміють наближену лінійну залежність між обертовими моментами, що виникають у з'єднаннях елементів руки при описаних вище умовах руху. Ці властивості інваріантні стосовно швидкості й напрямку руху, статі й віку людини.

Таким чином, траєкторії, плановані з врахуванням критеріїв K_1 і K_2 , можна вважати оптимальними з біомеханічної точки зору.

У цій статті задача планування траєкторій розв'язана на прикладі тріланкового маніпулятора з трьома ступенями вільності. Досліджувався рух його ланок у горизонтальній і вертикальній площинах. При цьому використано критерій K_3 з метою отримання можливості однозначного вибору конфігурацій маніпулятора, що має



а)



б)

Рис. 2. Загальний вид робота Mitsubishi RV-1A (а); діалогове вікно середовища програмування робота COSIROP (б)

рухову (кінематичну) надмірність. Можливість практичної реалізації отриманих траєкторій (для випадку руху ланок у вертикальній площині) була перевірена на роботі Mitsubishi RV-1A у лабораторії Інституту сучасних технологій Севтуну-FESTO (рис. 2,а). Програмування робота здійснювали в середовищі COSIROP (рис. 2,б).

При розв'язанні задачі використали рівняння динаміки маніпулятора з обертальними ступенями вільності, що, за припущення про абсолютну твердість ланок і відсутність люфтів і пружних деформацій у кінематичних парах, у загальному випадку має вигляд

$$M(\Phi)\ddot{\Phi} + N(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi) + H(\dot{\Phi}) = T(t), \quad (1)$$

де $\Phi, \dot{\Phi}, \ddot{\Phi}, T(t)$ – n -мірні вектори-стовпці узагальнених координат q_i , швидкостей \dot{q}_i , пришвидшень \ddot{q}_i і обертальних моментів τ_i у з'єднаннях ланок, відповідно; $M(\Phi)$ – симетрична додатна певна матриця інерції розміром $n \times n$; $N(\Phi, \dot{\Phi}), G(\Phi), H(\dot{\Phi})$ – n -мірні вектори-стовпці: моментів, обумовлених силами Коріоліса й відцентровими силами, гравітаційним навантаженням і тертям відповідно.

Диференціюючи обидві частини (1) за часом t і беручи до уваги один з критеріїв (K_1 або K_2), отримаємо функціонал виду

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{t_k} F(t, q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i, \ddot{\ddot{q}}_i) dt, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

необхідною умовою екстремуму якого є система рівнянь Ейлера-Пуассона:

$$\frac{\partial F}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_i} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial F}{\partial \ddot{q}_i} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial F}{\partial \ddot{\ddot{q}}_i} = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

розв'язком якої (з врахуванням K_3 або подібними критеріями), у свою чергу, є вектор-стовпець узагальнених координат $\Phi(t)$ у вигляді функцій часу, які однозначно визначають бажану траєкторію руху. Підстановка цього вектора і його похідних в (1) дає змогу визначити вектор обертальних моментів $T(t)$. Однак реалізувати бажану траєкторію, прикладаючи до ланок знайдені в такий спосіб обертальні моменти, практично неможливо через те, що рівняння (1) лише приблизно описує динаміку маніпулятора.

З метою практичної реалізації траєкторії робочого органа найближчої до бажаної, розроблена програма синтезу системи адаптивного керування, що ґрунтується на методі, запропонованому Х. Сераджи (H. Saraji) [10]. Його особливість полягає у використанні інверсії маніпулятора як регулятора прямого каналу керування, на вхід якого подається сигнал, що характеризує задану траєкторію. При цьому загальний сигнал керування, як це показано на рис. 3, складається з трьох компонентів [10]:

$$u(t) = u_{ff}(t) + u_{fb}(t) + u_{ax}(t), \quad (4)$$

де $u_{ff}(t)$ – сигнал, що генерується регулятором прямого каналу, в якому використовується інверсія маніпулятора; $u_{fb}(t)$ – сигнал, що генерується регулятором ланцюга зворотного зв'язку в робочій точці P_j ; $u_{ax}(t)$ – додатковий сигнал, що генерується відповідно до параметрів робочої точки P_j ($P_j = \{T(t_j), \Phi(t_j), \dot{\Phi}(t_{ji})\}$), t_j – деякий момент часу руху.

У методі Х. Сераджи використовується розбиття часу руху робочого органа на k ділянок і подання рівняння динаміки маніпулятора (1) на тимчасовому інтервалі

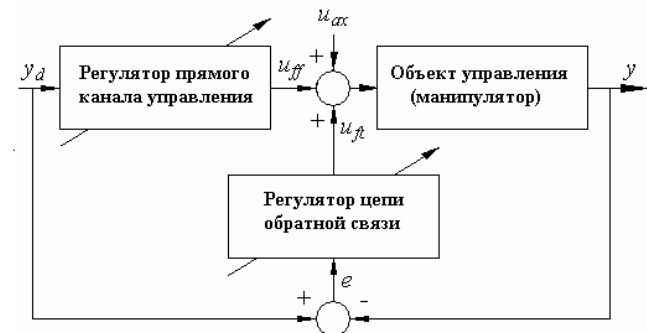


Рис. 3. Структурна схема системи керування

$t_j \leq t \leq t_j + \Delta t$ ($j=1, \dots, k$) лінійним диференціальним рівнянням

$$A\ddot{\theta}(t) + B\dot{\theta}(t) + C\theta(t) = \mu(t), \quad (5)$$

де $\theta(t) = \Phi(t) - \Phi(t_j)$; $\mu(t) = T(t) - T(t_j)$; $A = M(\Phi)|_{P_j}$;

$$B = \frac{\partial [N(\Phi, \dot{\Phi}) + H(\dot{\Phi})]}{\partial \dot{\Phi}} \Big|_{P_j}; \quad C = \frac{\partial [N(\Phi, \dot{\Phi}) + G(\Phi)]}{\partial \Phi} \Big|_{P_j}.$$

Оскільки в частотній області $\theta(s) = \frac{\mu(s)}{C + Bs + Cs^2}$, то передавальна функція інверсного регулятора прямого каналу керування має вигляд

$$Q(s) = C + Bs + As^2. \quad (6)$$

Отже, керування, що генерується регулятором прямого каналу, визначається виразами:

$$\mu_{ff}(s) = (C + Bs + As^2)\theta_r(s), \quad (8)$$

$$\mu_{fb}(t) = A\ddot{\theta}_r(t) + B\dot{\theta}_r(t) + C\theta_r(t), \quad (9)$$

де $\theta_r(t) = \Phi_r(t) - \Phi_r(t_j)$ — потрібний вектор-стовпець приростів узагальнених координат.

Керування, що генерується регулятором ланцюга зворотного зв'язку, подається так:

$$\mu_{fb}(s) = (K_p + K_v s)e(s), \quad (10)$$

$$\mu_{fb}(t) = K_v \dot{e}(t) + K_p e(t), \quad (11)$$

де $e(t) = \theta_r(t) - \theta(t)$ — вектор-стовпець приростів помилки відстеження за положенням; K_p і K_v — матриці коефіцієнтів зворотного зв'язку за положенням і за швидкістю, відповідно.

Підставивши відповідно до схеми керування $\mu(t) = \mu_{ff}(t) + \mu_{fb}(t)$ в (5), після нескладних перетворень отримаємо однорідне диференціальне рівняння помилки:

$$\ddot{e}(t) + A^{-1}(B + K_v)\dot{e}(t) + A^{-1}(C + K_p)e(t) = 0. \quad (12)$$

Коефіцієнти K_p і K_v завжди можуть бути підібрані так, що помилка відстеження траєкторії асимптотично наблизиться до нуля при $t \rightarrow \infty$. Якщо взяти до уваги позначення, використані в (5) і (9), то повний закон керування маніпулятором можна подати так:

$$\begin{aligned} T(t) &= \mu_{ff}(t) + \mu_{fb}(t) + \mu(t_j) = \\ &= A\ddot{\theta}_r(t) + B\dot{\theta}_r(t) + C\theta_r(t) + K_v \dot{e}(t) + K_p e(t) + \mu(t_j), \end{aligned} \quad (13)$$

або в іншій формі:

$$\begin{aligned} T(t) &= A\ddot{\Phi}_r(t) + B\dot{\Phi}_r(t) + C\Phi_r(t) + K_v \dot{E}(t) + K_p E(t) - \\ &- A\ddot{\Phi}(t_j) - B\dot{\Phi}(t_j) - C\Phi(t_j) + T(t_j), \end{aligned} \quad (14)$$

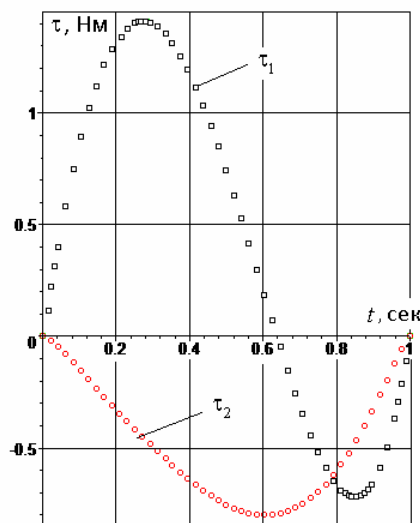
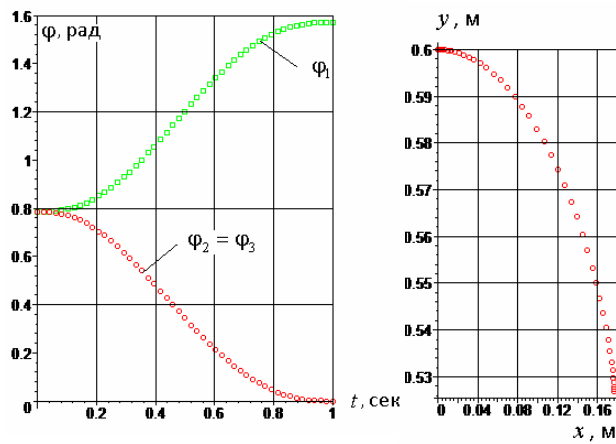


Рис. 4. Результати моделювання роботи системи керування: а — графіки зміни кутів повороту ланок; б — траєкторія руху; в — графіки зміни обертальних моментів

де $E(t) = \Phi_r(t) - \Phi(t)$ — вектор-стовпець помилки відстеження траєкторії.

Будемо вважати вектори $\Phi_r(t) = \Phi(t)|_{K=K_1 \cup K_2}$ і $T_r(t) = T(t)|_{K=K_1 \cup K_2}$ еталонними при реалізації переміщення робочого органа з початкової точки до кінцевої. Для того, щоб робочий орган найточніше відстежував еталонну траєкторію, скористаємося керуванням (14), що, однак, справедливо тільки на малому проміжку часу $t_j \leq t \leq t_j + \Delta t$, $j=1, \dots, k$, $\Delta t \rightarrow 0$. З метою отримання можливості використання (14) на всьому інтервалі руху по заданій траєкторії розроблена програма, що враховує адаптацію коефіцієнтів моделі A, B і C , які розглядалися як деякі функції часу.

Результати моделювання роботи описаної системи керування наведені далі. Як приклад розглянуто керування триланковим маніпулятором при русі ланок у горизонтальній площині. Параметри ланок і сили тертя у з'єднаннях були вибрані довільно.

Програма роботи описаної вище системи керування реалізована в системі Maple, тому оцінювати її швидкодію немає змісту. У цьому дослідженні ставилася задача перевірити можливість використання наведеного вище підходу й оцінити якість реалізованої при цьому системи керування. Слід зауважити, що, на відміну від методики Х. Сераджи [10], адаптація коефіцієнтів моделі з метою отримання можливості використання керування (14) на всьому інтервалі руху істотно простіша. Однак відкритим залишається питання про стійкість системи керування, успішно розв'язане в [10].

Література

1. Тимофеев А.В. Адаптивные робототехнические комплексы / А.В. Тимофеев. – Л.: Машиностроение, 1988. – 332 с.
2. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 400 с.
3. Горитов А.Н. Сглаживание траектории перемещения рабочего органа робота-манипулятора / А.Н. Горитов, С. М. Алферов // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – №8. – С. 176–179.
4. Uno Y. Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement – minimum torque-change model / Y. Uno, M. Kawato, R. Suzuki // Biological Cybernetics. – 1989. – Vol. 61. – P. 89–101.
5. Kolesova M.A. Planning of the manipulator end-effector trajectory by synergetic criterion / M.A. Kolesova, A.M. Plyakov, M.I. Kalinin // A proceedings volume from the 5-th IFAC workshop DECOM-TT 2007. – Cesme-Izmir, Republic of Turkey, 2007. – P. 185-190.

6. Marler R.T. A new discomfort function for optimization-based posture prediction / R.T. Marler, S. Rahnatalla, M. Shanahan, K. Abdel-Malek // SAE Human modeling for design and engineering conference. – Iowa city: Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, June 2005.

7. Колесова М.А. Определение и визуализация сингулярных поверхностей в рабочем пространстве манипулятора / М.А. Колесова, Ю.Е. Обжерин // Оптимизация производственных процессов. – 2007. – №10. – С. 21–28.

8. Hollerbach J. M. Dynamic interactions between limb segments during planar arm movement / J.M. Hollerbach, T. Flash // Biological Cybernetics. – 1982. – Vol. 44. – P. 67–77.

9. Lacquaniti F. Coordination of arm and wrist motion during a reaching task / F. Lacquaniti, J.F. Soechting // Journal of Neuroscience. – 1982. – Vol. 2. – P. 399–408.

10. Saraji H. A new approach to adaptive control of manipulators / H. Saraji // Journal of dynamic systems, measurement and control. – 1987. – No. 3. – P. 193–211.

Отримана 15.05.09

M. Poliakov¹, M. Kolesova¹, P. Shtanko²

Adaptive control of the manipulator end-effector movement on the optimum trajectories

¹Sevastopol National Technical University, Sevastopol;

²Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya

The task of the adaptive control of manipulator end-effector movement on trajectories, optimized according to criteria of the minimum work and the minimum change of the torques in joints is solved. At the solve of the inverse kinematics problem, the criterion of the minimum discomfort is used. The received results are illustrated by a number of examples. It is shown that the laws of controls have essential distinctions at different strategies and criteria of quality of an object movement.

Диспропансія

XVI INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS

May 24 — 28, 2010
Riga, Latvia

The present Conference follows the previous meetings in this series held in Riga from 1965 to 2008. The XVI International Conference intends to keep the customary themes of discussion. Traditionally on the Riga conferences, the number of participants is approximately 250 from many countries. So, the conference offers a good opportunity to meet colleagues from all over the world. The meeting history is available on the Conference website.

CONFERENCE SCIENTIFIC SECRETARY:

**Dr. K. Cirule, Institute of Polymer Mechanics,
University of Latvia**

23 Aizkraukles St., Riga, LV 1006, Latvia

phone: +371-67543121,

mob. phone: +371-29662710,

fax: +371-67820467;

e-mail: cirule@pmi.lv

<http://www.pmi.lv/html/ConfInfnf.htm>.