НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Координатная связь медицинского робота - манипулятора

12, декабрь 2012 DOI: 10.7463/0113.0520630 Банин Е.П., Барышева О.П., Батанов А.Ф., Богданова Ю.В., Гуськов А.М., Козубняк С.А., Нарайкин О.С., Пуценко А.А. УДК 531, 53.072, 62-5, 617-089, 617-7

> Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>evg.banin@gmail.com</u> <u>olgat@ecoinvent.ru</u> <u>sktb_pr@mail.ru</u> <u>bogdanova.bmstu@gmail.com</u> <u>gouskov_am@mail.ru</u> <u>sark@hexa.ru</u> <u>naraikin_os@nrcki.ru</u> <u>alexey.putsenko@gmail.com</u>

Введение

Одной из важнейших задач робототехники является задача обеспечения точного позиционирования конечной точки робота-манипулятора. При проведении операций с применением роботов – манипуляторов управление осуществляется исходя из силовых воздействий, действующих на инструмент. Данные усилия, возникающие в оперируемой ткани, в некоторых случаях являются непрогнозируемыми, и могут вызывать перемещения инструмента в направлениях, перпендикулярных направлению приложения рабочей силы. Это явление называется координатной связью.

Не учтенные отклонения инструмента от прогнозируемой траектории приводят к необходимости дополнительных управляющих воздействий, которые отрабатываются с некоторой погрешностью и могут приводить к серьезным нарушениям в оперируемой ткани. Поэтому оценка и учет координатной связи является ответственной задачей. В работе рассматривается несколько конфигураций робота, для которых производится оценка перемещения конечной точки робота-манипулятора под действием нагрузки.

В работе [1], посвященной основным вопросам проектирования роботов подобного типа, не рассматривается задача учета влияния координатной связи на систему управления. Несмотря на то, что вопрос расчета и моделирования роботов с гибкими элементами или жестких роботов – манипуляторов с учетом деформируемости отдельных элементов активно изучается в работах [2, 4], вопрос о локальных свойствах конкретных конструкций требует отдельного рассмотрения в каждом случае. В работе демонстрируется методика определения матрицы податливости в точке приложения рабочих воздействий на инструмент в зависимости от конфигурации робота. Анализ робота – манипулятора проводится методом конечных элементов.

Определение поведения робота-ассистента под действием нагрузки

Для оценки поведения точки приложения усилий под действием нагрузки производится расчет матрицы податливости для четырех различных конфигураций робота-манипулятора.

На рис. 1 изображен общий вид рассматриваемого робота-ассистента.



1 – зажим инструмента с установленным инструментом; 2 – блок приводов ориентации; 3
 – предплечье; 4 – плечо; 5 –привод плеча; 6 – опорно-поворотное устройство.

Рисунок 1 – Робот – манипулятор

Данный робот имеет 7 степеней свободы и состоит из 6 звеньев. Первое (№ 1, Рис. 1) звено соответствует установленному инструменту. Первое звено моделируется упрощенно. Исследуемые конфигурации робота – манипулятора приведены на Рис. 2.









б) Вторая конфигурация робота



в) Третья конфигурация робота

г) Четвертая конфигурация робота

Рисунок 2 – Конфигурации робота – манипулятора

Расчет полей перемещений

При расчете полей перемещений к каждому звену прикладывается нагрузка, соответствующая весу звена. Система с приложенными нагрузками показана на Рис. 3.





Нагрузки, вызванные силами веса звеньев робота, приложены в центре масс соответствующего звена (А-Е, Рис. 3). Нагрузка от веса инструмента приложена в точке F (Рис. 3). Вес инструмента – 10 H.

При расчете полей перемещений робота – манипулятора под действием только силы тяжести, сила, действующая на инструмент, не учитывается.

Разбиение на конечные элементы для данной конфигурации робота-манипулятора представлено на Рис. 4.



Рисунок 4 – Разбиение на конечные элементы модели робота – манипулятора

Расчет матрицы податливости

Рассматривается получение матрицы податливости. Расчет производиться для 4-х конфигураций робота – манипулятора.

При получении матрицы податливости рассматривается следующее представление:

$$\mathbf{q} = \mathbf{D}\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{6}$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{\theta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{M} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^{T} & \mathbf{C} \end{bmatrix} = \mathbf{D}^{T}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{F} + \mathbf{B}\mathbf{M} \quad \in \mathbb{R}^{3}$$

$$\mathbf{\theta} = \mathbf{B}^{T}\mathbf{F} + \mathbf{C}\mathbf{M} \quad \in \mathbb{R}^{3}$$
(1)

где $\mathbf{Q}_{6\times 1}$ – вектор нагрузок (обобщенные силы): $\mathbf{F}_{3\times 1}$ - сосредоточенная сила, $\mathbf{M}_{3\times 1}$ - сосредоточенный момент; $\mathbf{q}_{6\times 1}$ – вектор, характеризующий перемещения (обобщенные

координаты): **u** - вектор перемещений; $\oint_{3\times 1}$ - вектор малого поворота; **D** - матрица податливости размерностью 6×6, состоящая из симметричных блоков **A**, **C** и блока **B** размерностью 3×3. Матрица **D** симметричная и определенно положительная. Все матричные вычисления проводятся в абсолютном декартовом базисе {*x*, *y*, *z*} (см. рисунок 4).

В зависимости от конфигурации робота-ассистента, которая определяется углами поворота в узлах робота $\{\phi_0, \phi_1, \cdots\}$, матрица податливости **D** будет различной.

Вычисление матрицы податливости производится по следующей схеме:

(1) К выбранной конфигурации робота прикладываются по очереди шесть компонент сил в точке А в направлении соответствующих осей (Рис. 5): $\tilde{Q}_{(j)} \mathbf{e}_j, j = \overline{1,6}$, где \mathbf{e}_j – эвклидовы единичные векторы



Рисунок 5 – Положение системы координат конечной тоски робота – манипулятора

Точка А – точка приложения силы при расчете матрицы податливости, x, y, z – оси ортогонального базиса, расположенного в точке А.

- (2) Вычисляются все шесть компонент вектора перемещений $\tilde{\mathbf{q}}_{(j)}$ для каждого случая нагружения.
- (3) заполняется соответствующая колонка матрицы податливости

$$\mathbf{D}_{:,j} = \frac{\tilde{\mathbf{q}}_{(j)}}{\tilde{\mathcal{Q}}_{(j)}} \tag{2}$$

Данная схема расчета повторяется для следующей модификации системы.

Контроль за корректностью полученных вычислений осуществляется проверкой того, что матрица податливости должна получиться симметричной. В большом числе случаев взаимодействие инструмента с телом происходит в малой пространственной области и сводится только к сосредоточенной силе. В этом случае достаточно определить только блок **A** в (1) и рассматривать усеченную задачу

$$\mathbf{u} = \mathbf{A} \mathbf{F} \tag{3}$$

Вычисление матрицы **A** производится с помощью приложения последовательно трех сил в направлении координатных осей:

$$\mathbf{F}_{(j)} = a \, \mathbf{e}_{j},$$

$$\mathbf{e}_{1} = \begin{cases} 1\\0\\0 \end{cases}, \quad \mathbf{e}_{2} = \begin{cases} 0\\1\\0 \end{cases}, \quad \mathbf{e}_{3} = \begin{cases} 0\\0\\1 \end{cases}$$

$$\mathbf{A}_{:,j} = \frac{\tilde{\mathbf{u}}_{(j)}}{a}$$
(4)

Численное решение задачи методом конечных элементов

Перемещение звеньев робота под действием силы веса для конфигурации представленной на Рис. 2а и схемы нагружения представленной на Рис.3 имеют следующий вид:



Рисунок 6 – Поле абсолютных перемещений звеньев робота – манипулятора под действием силы веса

Поля перемещений робота имеют следующий вид (Рис. 7 - Рис. 9)



Рисунок 7 – Перемещение по оси Х инструмента робота



Рисунок 8 – Перемещение по оси У инструмента робота



Рисунок 9 – Перемещение по оси Z

Значения перемещений на конце инструмента для конфигурации, изображенной на Рис. 2, а под действием силы собственного веса звеньев и веса инструмента представлены в таблице 1.

Перемещение	Нагрузка – вес звеньев. Перемещение, м	Нагрузка – вес звеньев и вес
		инструмента.
		Перемещение, м
по оси Х	$4.9 \cdot 10^{-5}$	$6.1 \cdot 10^{-5}$
по оси Ү	-6.6 · 10 ⁻⁶	$-3.4 \cdot 10^{-6}$
по оси Z	$6.1 \cdot 10^{-4}$	$7.6 \cdot 10^{-4}$

Таблица 1 – Перемещения на конце робота – манипулятора для первой конфигурации.

Значения перемещений на конце инструмента для конфигурации, изображенной на Рис. 2, б под действием силы собственного веса звеньев и веса инструмента представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Перемещения на конце робота – манипулятора для второй конфигурации.

Перемещение	Нагрузка – вес звеньев. Перемещение, м	Нагрузка – вес звеньев и вес инструмента. Перемещение, м
по оси Х	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$7.3 \cdot 10^{-5}$
по оси Ү	$-5.0 \cdot 10^{-4}$	$-6.3 \cdot 10^{-4}$
по оси Z	$3.7 \cdot 10^{-5}$	$5.8 \cdot 10^{-5}$

Значения перемещений на конце инструмента для конфигурации, изображенной на Рис. 2, в под действием силы собственного веса звеньев и веса инструмента представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Перемещения на конце робота – манипулятора для третьей конфигурации.

Перемещение	Нагрузка – вес звеньев. Перемещение, м	Нагрузка – вес звеньев и вес инструмента. Перемещение, м
по оси Х	$-6.0 \cdot 10^{-5}$	-6.2 · 10 ⁻⁵
по оси Ү	-7.9 · 10 ⁻⁵	$-16.0 \cdot 10^{-5}$
по оси Z	$-5.2 \cdot 10^{-5}$	-6.3 · 10 ⁻⁵

Значения перемещений на конце инструмента для конфигурации, изображенной на Рис. 2, г под действием силы собственного веса звеньев и веса инструмента представлены в таблице 4.

Перемещение	Нагрузка – вес звеньев. Перемещение, м	Нагрузка – вес звеньев и вес инструмента. Перемещение, м
по оси Х	$2.4 \cdot 10^{-5}$	4.3 · 10 ⁻⁵
по оси Ү	$-3.8 \cdot 10^{-4}$	$-5.1 \cdot 10^{-4}$
по оси Z	-6.9 · 10 ⁻⁶	$-27.0 \cdot 10^{-6}$

Таблица 4 – Перемещения на конце робота – манипулятора для четвертой конфигурации.

Исходя из анализа данных, приведенных в таблицах, можно заключить, что при эксплуатации робота – манипулятора необходимо учитывать перемещения не только в направлении действия силы, но и в остальных направлениях.

В соответствии с проведенными расчетами ниже приводятся матрицы податливости **A** (3) для каждой из четырех рассматриваемых конфигураций робота – манипулятора.

Конфигурация 1:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3.79 \cdot 10^{-7} & 3.34 \cdot 10^{-7} & -1.05 \cdot 10^{-6} \\ 3.34 \cdot 10^{-7} & 2.83 \cdot 10^{-5} & -4.34 \cdot 10^{-7} \\ -1.05 \cdot 10^{-6} & -4.34 \cdot 10^{-6} & 1.69 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$$

Конфигурация 2:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.70 \cdot 10^{-5} & -3.18 \cdot 10^{-6} & -5.96 \cdot 10^{-6} \\ -3.18 \cdot 10^{-6} & 1.62 \cdot 10^{-5} & -2.37 \cdot 10^{-6} \\ -5.96 \cdot 10^{-6} & -2.37 \cdot 10^{-6} & 3.55 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$$

Конфигурация 3:

http://technomag.edu.ru/doc/520630.html

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 4.45 \cdot 10^{-6} & -5.85 \cdot 10^{-8} & 2.06 \cdot 10^{-7} \\ -5.85 \cdot 10^{-8} & 1.08 \cdot 10^{-5} & 1.37 \cdot 10^{-6} \\ 2.06 \cdot 10^{-7} & 1.37 \cdot 10^{-6} & 8.23 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}$$

Конфигурация 4:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 3.48 \cdot 10^{-6} & -2.09 \cdot 10^{-6} & 2.48 \cdot 10^{-6} \\ -2.09 \cdot 10^{-6} & 1.61 \cdot 10^{-5} & 3.04 \cdot 10^{-6} \\ 2.48 \cdot 10^{-6} & 3.04 \cdot 10^{-6} & 1.01 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}$$

Как видно, матрицы податливости являются симметричными (в пределах допустимой ошибки вычислений), что позволяет утверждать правильность расчета. В качестве примера рассмотрим конфигурацию 3. Пусть единичный вектор сосредоточенной силы $\mathbf{e}_{\mathbf{F}} = \mathbf{F}/\|\mathbf{F}\|$, приложенной к инструменту равен

$$\mathbf{e}_{\mathbf{F}} = \begin{cases} 0.4959\\ 0.6393\\ -0.5877 \end{cases}$$
(5)

Тогда единичный вектор смещения $(\mathbf{u} = \mathbf{A} \mathbf{F})$ точки приложения силы $\mathbf{e}_{\mathbf{u}} = \mathbf{u}/\|\mathbf{u}\|$ оказывается равным

$$\mathbf{e}_{\mathbf{u}} = \begin{cases} -0.1329\\ 0.9296\\ -0.3437 \end{cases}$$
(6)

На рисунке 10 показано относительное расположение векторов $\mathbf{e}_{u}, \mathbf{e}_{F}$ в пространстве



Рисунок 10 – Неколлинеарность векторов силы и перемещения для конфигурации 3. Условно начало координат помещено в точку приложения силы

Векторы $\mathbf{e}_{\mathbf{u}}, \mathbf{e}_{\mathbf{F}}$ образуют угол

$$\angle (\mathbf{u}, \mathbf{F}) = \arccos(\mathbf{e}_{\mathbf{u}}^{T} \mathbf{e}_{\mathbf{F}}) = 0.7516 = 43.0766^{\circ}$$
(7)

Как видим, в данном случае "несовпадение" направлений силы и перемещения точки приложения силы оказывается существенным, что, конечно, нужно учитывать при выборе рабочей конфигурации

Заключение

По результатам данного исследования можно заключить, что:

 при приложении усилий к инструменту смещение точки приложения усилий неколлинеарно вектору силы;

 в некоторых случаях перемещение точки приложения силы может быть направлено перпендикулярно вектору силы;

 в зависимости от положения звеньев робота, характер смещения точки приложения усилий изменяется. При учете результатов исследования становится возможным минимизация паразитных отклонений инструмента от требуемой траектории.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой научно - технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно – технологического комплекса России» на 2007 – 2012 годы, номер контракта 16.523.11.3011.

Список литературы

- 1. Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods, and Algorithms. 3rd ed. Springer, 2007. 550 p.
- Gilles B., Bousquet G., Faure F., Pai D.K. Frame-based elastic models // ACM Transaction on Graphics. 2011. Vol. 30, no. 2. Art. no. 15. DOI: 10.1145/1944846.1944855
- Siciliano B., Khatib O., eds. Springer Handbook of Robotics. Springer, 2008. 1611 p. DOI: 10.1007/978-3-540-30301-5
- Talbi N. Résolution du contact frottant entre objets déformables en temps réel et avec retour haptique : Thèse. l'Université d'EVRY VAL-d'ESSONNE, 2008. 168 p. (in French).

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Coordinate relationship of the medical robot - manipulator

12, December 2012

DOI: 10.7463/0113.0520630

Banin E.P., Barysheva O.P., Batanov A.F., Bogdanova Yu.V., Gus'kov A.M., Kozubnyak S.A., Naraikin O.S., Pucenko A.A.

Russia, Bauman Moscow State Technical University <u>evg.banin@gmail.com</u> <u>olgat@ecoinvent.ru</u> <u>sktb_pr@mail.ru</u> <u>bogdanova.bmstu@gmail.com</u> <u>gouskov_am@mail.ru</u> <u>sark@hexa.ru</u> <u>naraikin_os@nrcki.ru</u> <u>alexey.putsenko@gmail.com</u>

During surgical operations with the use of a robot-manipulator, control actions are managed by force effects in the area of the surgical operation. The constructional design of the robot is chosen according to the technological requirements for implementation of specific movements. It turns out that when a force is applied to the tool, displacement of the force application point can be non-collinear to the force vector. If interaction between a surgical instrument and the operation object can be reduced to a concentrated force, it is necessary to choose a beneficial robot configuration to avoid lateral offset. In this configuration the force vector must be aimed to the proper direction of the robot compliance matrix in the force application point. The proposed calculation method helps to construct a working configuration of the robot with respect to minimization of possible spurious derivation of the instrument from the requested trajectory.

Publications with keywords: instrument positioning, robotic surgery Publications with words: instrument positioning, robotic surgery

References

1) Angeles J. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Theory, Methods, and Algorithms. 3rd ed. Springer, 2007. 550 p.

- 2) Gilles B., Bousquet G., Faure F., Pai D.K. Frame-based elastic models. *ACM Transaction on Graphics*, 2011, vol. 30, no. 2, art. no. 15. DOI: 10.1145/1944846.1944855
- Siciliano B., Khatib O., eds. Springer Handbook of Robotics. Springer, 2008. 1611 p. DOI: 10.1007/978-3-540-30301-5
- Talbi N. Résolution du contact frottant entre objets déformables en temps réel et avec retour haptique : Thèse. l'Université d'EVRY VAL-d'ESSONNE, 2008. 168 p. (in French).