

Multi-Domain Model for the Evaluation of Large Scale Robotic Applications within Production

Davis Meike (Riga Technical University)

Keywords – Robotics, Industrial application, Simulation, Energy Efficiency

I. INTRODUCTION

In this paper, a multi-domain model for automated evaluation of large scale robot production lines is presented. The model allows to determine the energy consumption of the robotic applications from the given robot programs. It is an enabler, to select the optimal DC bus energy buffer depending on robot program [4] or to compare optimized trajectories [2].

The developed modeling tool-chain is based on a robot controller software interpreter, internal path planner, RCS-module, kinematic and dynamic sub-models and an electrical drive sub-model. The according block diagram is shown in Fig.1.

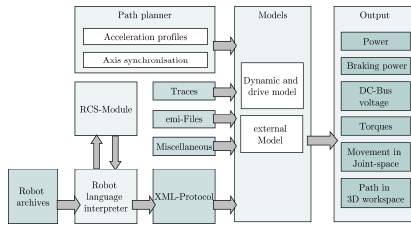


Fig. 1. Modeling tool-chain of a robot system

II. ROBOT SYSTEM MODELING

A. Rigid body kinematics and dynamics

The geometric model of a manipulator was developed as shown in Fig.2. Joints $A1 \dots A6$ and frames $o_1 \dots o_6$ are assigned to according links, whereas o_0 is the base frame. The geometric model delivers kinematic transformations from joint to workspace and vice versa.

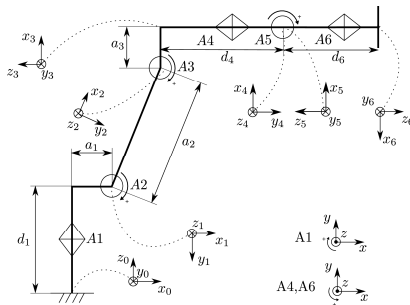


Fig. 2. Manipulator's geometric model

For energy consumption modelling an inverse dynamic model is used. The vector of manipulator axes' torques is expressed in form

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + g(q) + E(\dot{q}), \quad (6)$$

where $D(q)$ is a manipulator's inertia matrix, $C(q, \dot{q})$ is a matrix of centripetal and Coriolis forces, $F(\dot{q})$ is a torque caused by viscous and Coulumb friction, and $g(q)$ is a vector of gravitational torques. $E(\dot{q})$ represents external forces that act on manipulator like weight balancer of the axis 2, but q is

a vector of axes' positions. The Eq.6 is solved using Newton-Euler Recursive approach.

B. Electrical drive model

The calculation of the power exchange in within the DC bus is based on iterative calculation of energy sinks and sources over an integration step. The resulting DC bus voltage is

$$u_{dc} = \sqrt{\frac{2(w_{C,act} + w_{ac} - w_m - w_{ch} - w_{inv})}{C_{dc}}}, \quad (28)$$

where C_{dc} is the DC-bus capacitance; $w_{C,act}$ is the energy in C_{dc} of previous/initial integration step; w_{ac} is an energy required from the AC network; w_m is the mechanical energy requirement derived from dynamic model considering motor losses; w_{ch} energy on brake chopper, but w_{inv} represents the inverter losses.

C. Experimental model validation

The explicit model validation has been done by comparing tolerances of the geometric model, resulting motor torques, DC-Bus voltage and AC power with the measurements. Numerical results of KUKA KR210-2 manipulator's dynamic model with KRC2 controller show a maximal error below 2%, whereas geometric model has a maximum error of 0.017mm.

III. CONCLUSIONS

Model validation results present accuracy within 2% of the dynamic model that is crucial for minimum-effort trajectory generation.

The modelling chain allows an automated analysis of the effect of the extended DC bus buffer for a particular robotic application. The developed multi-domain model can be used as for research and development as for energy determination of robotic applications without explicit knowledge in robotics.

REFERENCES

- [2] J. O. Davis Meike, Christian Hansen and T. Ortmaier, "Enhanced approach for energy-efficient trajectory generation of industrial robots," in The IEEE 8th Int. Conf. on Automation Science and Engineering, 2012.
- [4] D. Meike and L. Ribickis, "Recuperated energy savings potential and approaches in industrial robotics," in The IEEE 7th Int. Conf. on Automation Science and Engineering, 2011, pp. 299–303.

Industriālo robotu sistēmu modelis liela mēroga robotizētu ražotņu analīzei

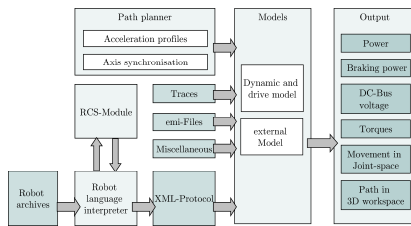
Davis Meike (Riga Technical University)

Atslēgvārdi (angl.) – Robotics, Industrial application, Simulation, Energy Efficiency

I. IEVADS

Augsti automatizētās ražotnēs, kā, piemēram, autoindustrijā, nereti izmantoti vairāki tūkstoši industriālo robotu, kuri katrs atšķiras ar savu programmu, celtspēju, noslogotību un citiem parametriem, kas ietekmē to energopatēriņu. Šodien komerciāli pieejama dažāda programmatūra robotu kinemātikas modelēšanai, retāk sastopami produkti ir robotu dinamikas modelēšanai, taču modeļu elektropatēriņa noteikšanai nav pieejami.

Darbā tiek prezentēts industriālo robotu sistēmu modelis liela mēroga robotizētu ražošanas līniju energopatēriņa noteikšanai un analīzei. Modelis ietver robotu programmu interpretatoru, kinemātikas/dinamikas un elektropiedziņas apakšmodeļus. Diagramma ar datu plūsmu starp moduļiem ilustrēta 1.att.

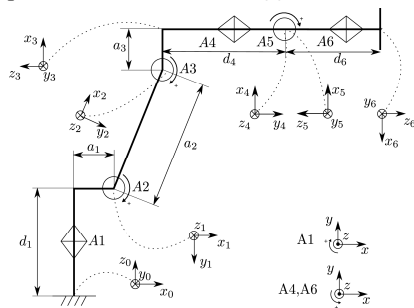


1. att. Robotu sistēmas modelis.

II. ROBOTU SISTĒMAS MODEĻĒŠANA

A. Robota manipulatora kinemātikas un dinamikas modelis

2. att. dots robota manipulatora modelis ar asīm $A1...A6$ un attiecīgi izvēlētajām koordinātu sistēmām $o_1...o_6$. Šeit, o_0 ir bāzes koordinātu sistēma. Ģeometriskais modelis ir pamats dinamiskajam modelim un ļauj aprēķināt manipulatora pozīciju telpā atkarībā no locītavu leņķiem.



Att. 2. Manipulatora ģeometriskais modelis

Manipulatora asu spēka momenti aprēķināti, izmantojot Ņūtona-Eilera metodi. Asu spēka momentu vektors izteikts kā

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + g(q) + E(q), \quad (6)$$

kur $D(q)$ ir manipulatora inerces matrica, $C(q, \dot{q})$ apkopo centrtieces and Koriolisa spēkus, $F(\dot{q})$ ir berzes moments, $g(q)$ ir gravitācijas spēks. $E(q)$ apkopo ārējās iedarbības

spēkus, kā piemēram, balansa sistēma uz ass 2, bet q ir asu pozīcijas vektors.

B. Elektriskās piedziņas modelis

Izmantots vienkāršots elektriskās piedziņas modelis, kas balstīts uz enerģijas vienību apmaiņu līdzsprieguma posmā. Līdzsprieguma posma spriegums katrā integrācijas soli aprēķināts kā

$$u_{dc} = \sqrt{\frac{2(w_{C,act} + w_{ac} - w_m - w_{ch} - w_{inv})}{C_{dc}}}, \quad (28)$$

kur C_{dc} ir līdzsprieguma posma kapacitāte; $w_{C,act}$ enerģija kondensatorā C_{dc} iepriekšējā/sākotnējā aprēķina solī; w_{ac} nepieciešamā enerģija no maiņsprieguma tīkla; w_m ir nepieciešamā manipulatora enerģija, kas aprēķināta no dinamikas modeļa; w_{ch} enerģija uz dzēšanas rezistora, bet w_{inv} ir invertora zudumi.

C. Modeļa validēšana

Detalizēta modeļa salīdzināšana ar mērījumu rezultātiem veikta, izmantojot KUKA KR210-2 tipa robota manipulatoru un KR C2 kontrolleri. Mērīts un salīdzināts ir ģeometriskais modelis, motoru spēka momenti, līdzsprieguma posma spriegums un strāvas. Maksimālā reģistrētā kļūda ir 2% dinamikas un 0.017mm ģeometriskajam modelim.

III. SECINĀJUMI

Izstrādātā dinamikas modeļa precizitāte ir pietiekama, lai objektīvi salīdzinātu dažādas manipulatoru trajektorijas [2]. Modeļa ieejas dati ir robota kontrollera programmu teksta datnes, savukārt modeļa arhitektūra ļauj automātiski analizēt neierobežotu skaitu robotu programmas. Tādējādi, iespējams izvērtēt paaugstinātas līdzsprieguma posma kapacitātes efektu [4] uz kopējo patēriņu tiešā atkarībā no robota programmas tipa un manipulatora noslodzes.

Izstrādāto modeli var izmantot gan ražošanas plānošanā, gan detalizētā atsevišķu robotu sistēmu optimizēšanā.

LITERATŪRA

- [2] J. O. Davis Meike, Christian Hansen and T. Ortmaier, "Enhanced approach for energy-efficient trajectory generation of industrial robots," in *The IEEE 8th Int. Conf. on Automation Science and Engineering*, 2012.
- [4] D. Meike and L. Ribickis, "Recuperated energy savings potential and approaches in industrial robotics," in *The IEEE 7th Int. Conf. on Automation Science and Engineering*, 2011, pp. 299–303.

Модель промышленного робота для анализа крупных роботизированных производств

Davis Meike (Riga Technical University)

Ключевые слова (англ.) – Robotics, Industrial application, Simulation, Energy Efficiency

I. ВВЕДЕНИЕ

В статье представлена многофункциональная модель автоматического оценивания крупномасштабных роботизированных производственных линий. Модель позволяет определить потребление энергии роботизированных приложений, анализируя программы для роботов. Она является помощником для выбора оптимального энергетического буфера сети прямого тока в зависимости от программы робота [4] или для сравнения различных оптимизированных траекторий [2].

Разработанные средства моделирования основаны на программном интерпретаторе контроллера робота, внутреннем планировщике пути, RCS-модуле, кинематических и динамических подмоделях, а также на подмоделях электропривода. Соответствующая блок-диаграмма показана ниже на Рис. 1.

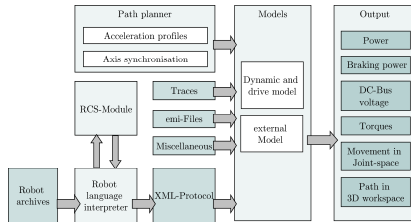


Рис. 1. Средства моделирования роботизированных систем.

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

A. Кинематика и динамика твёрдого тела

Разработанная геометрическая модель манипулятора представлена на Рис. 2, которая состоит из сочленений $A1...A6$ и координатных систем $o_1...o_6$, где o_0 это базовая координатная система. Геометрическая модель это основа динамической модели, которая позволяет рассчитать положение манипулятора в пространстве исходя из углов суставов.

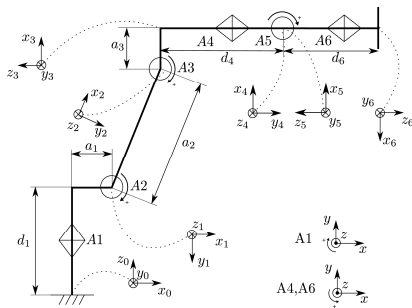


Рис. 2. Геометрическая модель манипулятора

Для моделирования потребления энергии используется обратная динамическая модель. Вектор момента оси манипулятора выражается в следующей форме:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + g(\dot{q}) + E(\dot{q}), \quad (6)$$

где $D(q)$ - матрица моментов инерций манипулятора, $C(q, \dot{q})$ - матрица центробежных сил и сил Кориолиса, $F(\dot{q})$ - момент торможения, а $g(\dot{q})$ - вектор гравитационных моментов. $E(\dot{q})$ характеризует внешние силы, которые действуют на манипулятор в виде балансирующего противовеса на оси 2, а q - вектор положений осей. Выражение (6) было решено с использованием рекурсивного метода Ньютона-Эйлера.

B. Модель электропривода

Расчёт энергобаланса сети прямого тока основан на итерационном подсчёте энергии потребителей и источников в течение шага интегрирования. Конечное напряжение сети DC выражено в следующем виде:

$$u_{dc} = \sqrt{\frac{2(w_{C,act} + w_{ac} - w_m - w_{ch} - w_{inv})}{C_{dc}}}, \quad (28)$$

где C_{dc} - ёмкость сети DC; $w_{C,act}$ - энергия в C_{dc} за предыдущий/начальный шаг интегрирования; w_{ac} - энергия потребляемая из AC сети; w_m - требуемая механическая энергия, рассчитываемая в динамической модели, учитывающая потери привода; w_{ch} - энергия торможения, а w_{inv} - потери инвертера.

C. Экспериментальная проверка модели

Точная проверка модели была осуществлена путём сравнения допусков геометрической модели, моментов двигателей, напряжения сети DC и потребляемую мощность из сети AC с произведёнными измерениями. Числовые результаты динамической модели манипулятора KUKA KR210-2 с контроллером KRC2 показали максимальную ошибку ниже 2%, а ошибка геометрической модели составила 0.017 мм.

III. ВЫВОДЫ

Проверка выявила точность динамической модели в пределах 2%, что позволяет объективно сравнивать разные траектории манипулятора.

Моделирование позволяет автоматически анализировать эффект увеличенного буфера сети DC для конкретного роботизированного приложения. Разработанная многофункциональная модель может быть использована как для исследований и разработки, так и для определения энергии роботизированных приложений без углублённых знаний в робототехнике.

ЛИТЕРАТУРА

- [2] J. O. Davis Meike, Christian Hansen and T. Ortmaier, "Enhanced approach for energy-efficient trajectory generation of industrial robots," in *The IEEE 8th Int. Conf. on Automation Science and Engineering*, 2012.
- [4] D. Meike and L. Ribickis, "Recuperated energy savings potential and approaches in industrial robotics," in *The IEEE 7th Int. Conf. on Automation Science and Engineering*, 2011, pp. 299-303.