

# Large Base Motion Compensation of Serial Robots Using the Virtual Redundant Axis Approach

Vladimirs Leontjevs (*University Duisburg-Essen – UDE*), Francisco Geu Flores (*UDE*),  
Jesús López (*Universidad Nacional de Educación a Distancia*), Leonids Ribickis (*Riga Technical University*)  
and Andres Kecskeméthy (*UDE*)

**Keywords – Robotics, motion control, control of drive, virtual instrument.**

## I. INTRODUCTION

For large robot-base displacements, for instance caused by short and long crested waves on a vessel, large vertical displacements at the robot end-effector with respect to the base are expected. In these cases, the robot typically will pass through singularity configurations, as in the example for the here chosen KUKA KR500 architecture the wrist singularity displaying collinear fourth and sixth axes. It is well-known that such singularity configurations may cause infinitely large joint velocities and moments [2] and thus must be avoided. In the literature, there exist three basic methods for singularity avoidance [3]: the Jacobian transpose, the Jacobian pseudo-inverse and the damped least-squares Jacobian inverse. All three methods are well-established, and highly-specialized algorithms exist, in particular for the damped least-squares method. The basic idea of these approaches is to reduce the norm of the joint axes increments – possibly with weighted selections of axes and thereby to circumvent the singularity locus. Remarkably, the weighted damped least-squares Jacobian inverse method (WDLS) is especially directed to overcoming the problem of a robot control through singularities and is known to have stability in the neighborhood of singularities.

Although the WDLS method is known to work quite well in practice, it has some slight disadvantages such as the mixing of tracking errors at the end effect or when approaching singularity and a tendency to small jerks at the switching points. Such properties can be disadvantageous when carrying sensitive loads at the end effector. For this reason, in this paper we propose a new approach including a virtual redundant axis (Fig. 1) in which all errors induced by singularity avoidance can be concentrated in one individual direction (Fig. 2), and which runs throughout the complete motion without switching points. In this way, rough base motions can be compensated, reducing the danger of violating position, velocity or acceleration limits and thus of running into emergency stops, which would lead to unpredictable end-effector motions. An industrial robot with kinematically consistent robot axis control is employed so that the robot dynamics need not be considered. Such aspects will be tackled in future publications.

## VI. CONCLUSIONS

For the incorporation of robot kinematical constraints, we propose a simplified method which is a subset of the method of developed by Kröger and Wahl [8]. Altogether, the ensuing robot control proved to be robust for large wave motion on a KUKA KR500 architecture. Finally, the least squares polynomial fitting provided smooth velocity and acceleration estimations for checking for robot limit compliance.

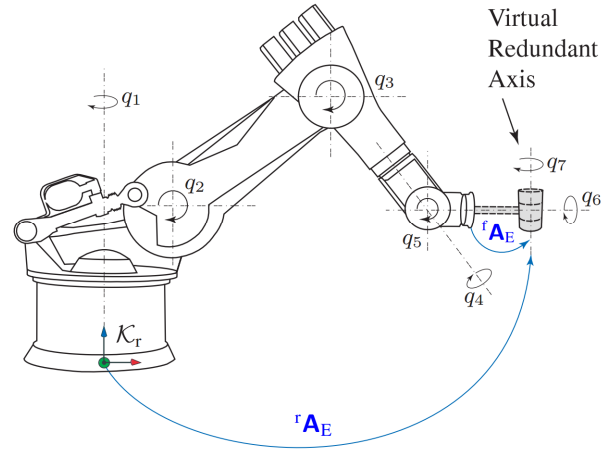


Fig. 4. Robot with virtual redundant axis  $q_7$

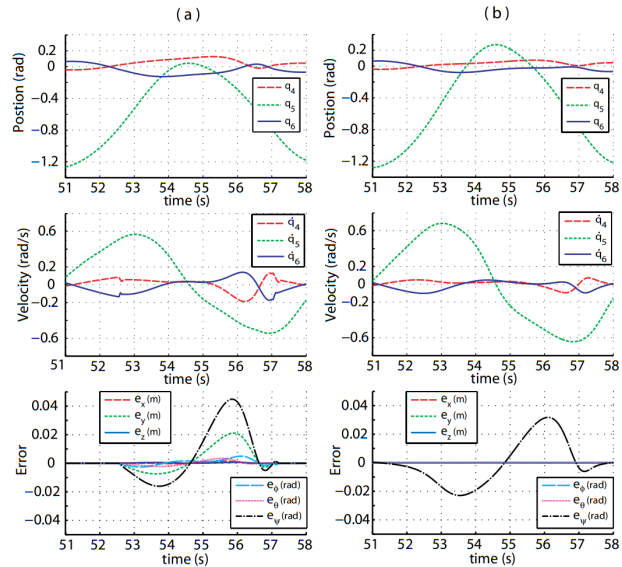


Fig. 5. Robot target motion for a simulated wave-like base motion with vertical amplitude  $H = 2.6$  m and a sampling time  $\Delta t = 0.04$  s, showing the response to wrist singularities. Case (a) non-redundant WDLS method, case (b) virtual redundant axis method.

## REFERENCES

- [2] E. W. Aboaf and R. P. Paul, "Living with the singularity of robot wrists," in Proc. IEEE Int. Conf on Robot and Automat. Raleigh, Mar.-Apr. 1987, pp. 1713 – 1717.
- [3] S. Chiaverini, L. Sciavicco, and B. Siciliano, "Control of robotic systems through singularities," Springer Advanced Robot Control, vol. 162, pp. 285 – 295, 1991.
- [8] T. Kröger and F. Wahl, "On line trajectory generation: Basic concepts for instantaneous reactions to unforeseen events," IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no 1, pp. 94 – 111, 2010.

# Virknes robotu lielu bāzes kustību kompensēšana, izmantojot virtuālās papildus ass paņēmieni

Vladimirs Leontjevs (*University Duisburg-Essen – UDE*), Francisco Geu Flores (*UDE*),  
Jesús López (*Universidad Nacional de Educación a Distancia*), Leonids Ribickis (*Riga Technical University*)  
and Andres Kecskeméthy (*UDE*)

**Atslēgvārdi (angl.) – Robotics, motion control, control of drive, virtual instrument..**

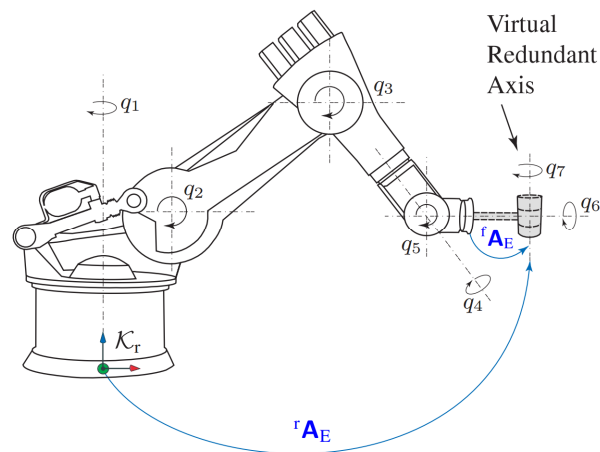
## I. IEVADS

Pie lielām robota bāzes nobīdēm, piemēram, gadījumos, kad kuģis tiek šūpots īsos un garos cekulainos viļņos, ir paredzama liela robota gala instrumenta vertikālā nobīde attiecībā pret bāzi. Šādos gadījumos robots parasti izies caur singularitātes konfigurācijām, šajā piemērā izvēlēta KUKA KR500 arhitektūras locītavas singularitāte uzrāda kolineāru ceturto un sesto asi. Ir labi zināms, ka tādas singularitātes konfigurācijas var novest pie bezgalīgi lieliem locītavu ātrumiem un momentiem [2], tādēļ no tām ir jāizvairās. Literatūrā eksistē trīs pamata paņēmieni, lai izvairītos no singularitātes [3]: Jakobiāna transponēšana, Jakobiāna pseidoinvertija un slāpētā mazāko kvadrātu Jakobiāna inversija. Visas trīs metodes ir labi zināms, un eksistē augsti specializēti algoritmi īpaši slāpēto mazāko kvadrātu metodei. Šo piegājieni pamata ideja ir samazināt locītavu asu pieaugumu normu – vēlams ar svērtām asu izvēlēm, apejot singularitātes punktu. Būtiski, ka svērtā slāpēto mazāko kvadrātu Jakobiāna inversijas metode (WDLS) ir īpaši piemērota, lai novērstu robota vadības problēmas, kas saistītas ar singularitātēm, kā arī ir zināms, ka tā ir stabila singularitāšu tuvumā.

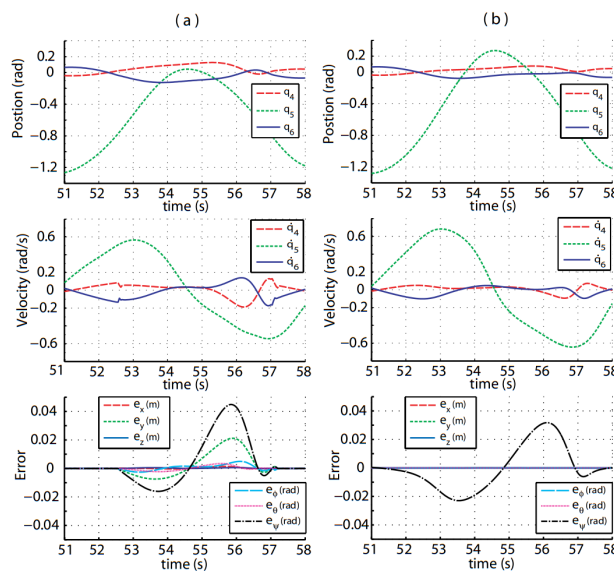
Lai gan ir zināms, ka WDLS metode ir efektīva praksē, tai tomēr ir daži trūkumi, piemēram, sekošanas kļūdu apvienošana gala instrumentā vai tuvojoties singularitātei, kā arī neliela raustīšanās pārslēgšanās punktos. Šīs īpašības var kļūt nevēlamas gadījumos, kad gala instruments pārvieto trauslu kravu. Dēļ šiem iemesliem, šajā rakstā ir piedāvāts jauns paņēmieni, kurš izmanto virtuālo papildus asi (1. att.), kurā visas ar singularitātes apiešanu radītās kļūdas var tikt savāktas vienā virzienā (2. att.), un kurš izpilda visu kustību bez pārslēgšanās punktiem. Ar šo paņēmieni var kompensēt rupjas bāzes kustības, samazinot draudus pozīcijas nobīdei, ātrumam vai paātrinājuma lielumam, līdz ar to izvairoties no avārijas apturēšanas, kura noved pie neparedzamām gala instrumenta kustībām. Tika pielietots industriālais robots ar kinemātiski konsekventu robota asu vadību, līdz ar to robota dinamiku nav nepieciešams ņemt vērā. Šie aspekti tiks apskatīti turpmākajos rakstos.

## VI. SECINĀJUMI

Robota kinemātisko ierobežojumu iekļaušanai tiek piedāvāta vienkāršota metode, kura ir apakškopa no metodes, kuru izveidojis Kröger un Wahl [8]. Kopumā ņemot, izveidotā robota vadība ir robusta pie lielām viļņu kustībām, izmantojot KUKA KR500 arhitektūru. Visbeidzot, mazāko kvadrātu polinomā izmantošana nodrošina vienmērīgu ātruma un paātrinājuma novērtējumu, kas nepieciešams robota robežlielumu saderībai.



1. att. Robots ar virtuālo papildus asi  $q_7$ .



2 att. Robota mērķa kustība pie modelētas viļņveida bāzes kustības ar vertikālo amplitūdu  $H = 2.6$  m un paraugošanas laiku  $\Delta t = 0.04$  s, attēlota atbilde uz locītavas singularitātēm. Gadījums (a) bez papildus ass WDLS metode, gadījums (b) ar virtuālo papildus ass metodi.

## LITERATŪRA

- [2] E. W. Aboaf and R. P. Paul, "Living with the singularity of robot wrists," in Proc. IEEE Int. Conf on Robot and Automat. Raleigh, Mar.-Apr. 1987, pp. 1713 – 1717.
- [3] S. Chiaverini, L. Sciavicco, and B. Siciliano, "Control of robotic systems through singularities," Springer Advanced Robot Control, vol. 162, pp. 285 – 295, 1991.
- [8] T. Kröger and F. Wahl, "On line trajectory generation: Basic concepts for instantaneous reactions to unforeseen events," IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no 1, pp. 94 – 111, 2010.

# Компенсация больших смещений основания последовательных роботов, используя метод виртуальной дополнительной оси

Vladimirs Leontjevs (*University Duisburg-Essen – UDE*), Francisco Geu Flores (*UDE*),  
Jesús López (*Universidad Nacional de Educación a Distancia*), Leonids Ribickis (*Riga Technical University*)  
and Andres Kecskeméthy (*UDE*)

**Ключевые слова (англ.) – Robotics, motion control, control of drive, virtual instrument.**

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для больших смещений основания робота, например, вызванные на кораблях волнами с короткими или длинными гребнями, случаются большие вертикальные перемещения рабочего органа относительно основания робота. В таких случаях робот обычно проходит положение сингулярности, как на примере выбранной архитектуры KUKA KR500, сингулярность цапфы показана коллинеарными четвёртой и шестой осями. Известно, что такие положения сингулярности могут вызвать бесконечно большие моменты на суставах [2] и следовательно должны быть предотвращены. В литературе встречаются три основных метода предотвращения сингулярности [3]: транспонирование матрицы Якоби, псевдо-инверсный метод Якоби и алгоритм Левенберга-Марквардта (АЛМ). Все три метода хорошо изучены и существуют высоко-специализированные алгоритмы, особенно для АЛМ.

Несмотря на то, что АЛМ хорошо применим на практике, имеются также некоторые незначительные недостатки, такие, как смешивание ошибки слежения рабочего органа или при приближении к сингулярности, а также тенденция к небольшим подёргиваниям в переходных точках. Такие особенности могут быть неприемлемыми при перемещении чувствительных грузов. Поэтому, в настоящей статье мы предлагаем новый метод, использующий виртуальную дополнительную ось (Рис. 2), где все ошибки, вызванные избеганием сингулярности, могут быть сконцентрированы в одном индивидуальном направлении. (Рис. 6), и который действовал бы на протяжении всего движения без переходных точек. В таком случае, резкие движения основания могут быть скомпенсированы, уменьшая как опасность нарушения положения, так и пределы скорости и ускорения, из-за которых могут случаться аварийные остановки, которые приводят к непредсказуемым движениям исполнительного органа.

## VI. ВЫВОДЫ

Для учитывания кинематических ограничений робота, мы предлагаем упрощённый метод, который является производным от метода Крёгера и Ваала [8]. В целом, приведенный метод управления робота показал надёжность при больших волнообразных движениях выбранной архитектуры манипулятора KUKA KR500. В заключении, алгоритм полиномиальной аппроксимации наименьших квадратов обеспечил точные расчёты скорости и ускорения для проверки соответствия пределам возможностей робота.

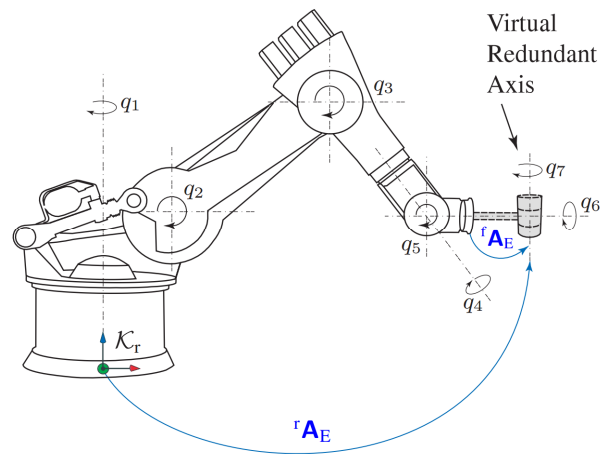


Рис. 2. Робот с виртуальной дополнительной осью q-7

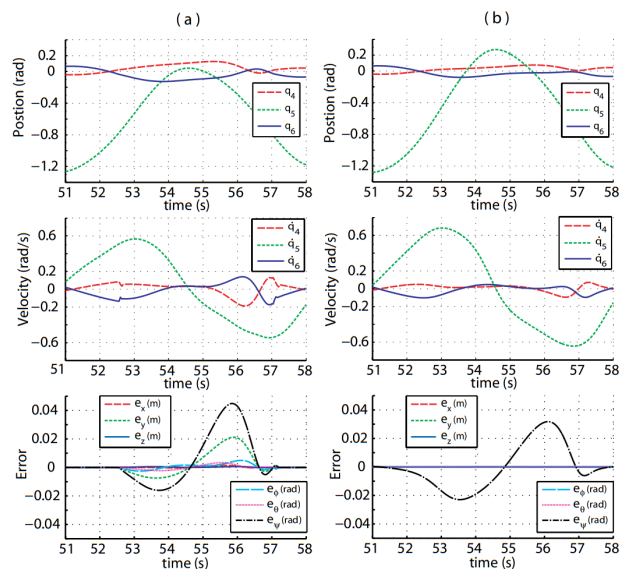


Рис. 6. Целевое движение робота при симулированном волнообразном движении основания с вертикальной амплитудой  $H=2.6$  м и временем выборки  $\Delta t=0.04$  с, показывая реакцию сингулярностей цапфы. (а) метод АЛМ, (б) метод с виртуальной дополнительной осью.

## ЛИТЕРАТУРА

- [2] E. W. Aboaf and R. P. Paul, "Living with the singularity of robot wrists," in Proc. IEEE Int. Conf on Robot and Automat. Raleigh, Mar.-Apr. 1987, pp. 1713 – 1717.
- [3] S. Chiaverini, L. Sciavicco, and B. Siciliano, "Control of robotic systems through singularities," Springer Advanced Robot Control, vol. 162, pp. 285 – 295, 1991.
- [8] T. Kröger and F. Wahl, "On line trajectory generation: Basic concepts for instantaneous reactions to unforeseen events," IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no 1, pp. 94 – 111, 2010.