



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Towards design space exploration of industrial distributed cyber-physical systems

Saadatmand, F.S.

Citation

Saadatmand, F. S. (2026, September 30). *Towards design space exploration of industrial distributed cyber-physical systems*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4310251>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4310251>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Nederlandse Samenvatting

De toenemende complexiteit en prestatie-eisen van industriële gedistribueerde cyberfysieke systemen (dCPS), zoals lithografiemachines in de halfgeleiderproductie, vereisen ontwerpvalidatietechnieken in een vroeg stadium die zowel efficiënt als nauwkeurig zijn. Design Space Exploration (DSE) is in deze context essentieel, omdat hiermee alternatieve hardware- en softwareconfiguraties kunnen worden geëvalueerd vóór de daadwerkelijke implementatie. Bestaande DSE-tools en -methodologieën schieten echter tekort voor industriële dCPS: ze missen een globaal systeemmodel, zijn sterk afhankelijk van handmatige en in de praktijk onhaalbare modelconstructie, en bieden vaak onvoldoende schaalbare ondersteuning voor simulatie en optimalisatie om grote ontwerpruimten op systeemniveau efficiënt te verkennen.

Om deze beperkingen te overwinnen, introduceert dit proefschrift CompDSE, een gestructureerde methodologie voor het uitvoeren van DSE op systeemniveau, toegespitst op de cybercomponenten van industriële dCPS. De methodologie integreert efficiënte systeemmodellering met geautomatiseerde tools voor modelafleiding, modeltransformatie en het genereren van simulatieklare code, wat resulteert in een samenhangende workflow voor de evaluatie van systeemprestaties. CompDSE is met name geschikt voor bestaande complexe industriële dCPS die worden onderzocht met het oog op upgrades naar een volgende generatie.

CompDSE is opgebouwd rond drie abstracte modellen volgens de Y-chart-benadering: het applicatiewerklastmodel, het hardwareplatformmodel en het mappingmodel. Het applicatiewerklastmodel beschrijft het gedrag en de interacties van gedistribueerde softwareprocessen; het hardwareplatformmodel beschrijft de beschikbare rekeninfrastructuur, waaronder verwerkingscomponenten en interconnectienetwerken; en het mappingmodel specificeert hoe softwareprocessen aan hardwarebronnen worden toegewezen. Daarnaast introduceert CompDSE het omgevingsinvloedmodel, dat de impact op de timing vastlegt van niet-getraceerde embedded hosts die interacteren met de fysieke omgeving, bijvoorbeeld via sensoren en actuatoren, maar die niet expliciet kunnen worden gemodelleerd. Al deze modellen zijn gedefinieerd op een hoog abstractieniveau om efficiënte DSE mogelijk te maken, terwijl voldoende nauwkeurigheid behouden blijft voor betekenisvolle prestatie-evaluatie.

De CompDSE-toolbox omvat een reeks algoritmen die automatisch de abstracte

modellen afleiden uit executietraces die zijn verzameld uit industriële systemen in de praktijk. Deze op traces gebaseerde aanpak stelt het modelleringsraamwerk in staat om voor elke bedrijfsmodus van het systeem een specifiek model te genereren, waarin het onderscheidende gedrag en de interacties van processen in die modus nauwkeurig worden weerspiegeld. De toolbox bevat daarnaast modeltransformatiealgoritmen die deze abstracte modellen omzetten in simulatieklare entiteiten voor uitvoering in een discrete-event-simulatieomgeving, evenals codegeneratiealgoritmen die de vereiste simulatiecode produceren. Samen maken deze tools een efficiënte en systematische prestatieanalyse van elk ontwerppunt mogelijk.

De effectiviteit van CompDSE wordt aangetoond door middel van een evaluatie op een ASML TWINSCAN-lithografemachine als representatieve industriële dCPS-casestudy. De resultaten laten zien dat de modellen die automatisch door CompDSE worden afgeleid, het waargenomen gedrag van het werkelijke systeem nauwkeurig reproduceren. In het bijzonder wijkt de gesimuleerde gemiddelde waferverwerkingstijd 2,7% af van de daadwerkelijke systeemmetingen. Ondanks de complexiteit en schaal van de resulterende modellen kan elk ontwerppunt in minder dan één minuut worden gesimuleerd. Deze bevindingen tonen aan dat CompDSE voldoende nauwkeurigheid bereikt voor betekenisvolle DSE, terwijl de simulatie-efficiëntie behouden blijft die nodig is voor het verkennen van de grote ontwerpruimten die kenmerkend zijn voor industriële dCPS.

Om de analyse van gelijktijdige uitvoering verder te verbeteren, introduceert dit proefschrift een verfijnd applicatiewerklastmodel dat zowel afhankelijkheden tussen processen als afhankelijkheden binnen processen kan vastleggen. Dit verfijnde model wordt automatisch afgeleid uit executietraces en ondersteunt een methode voor het identificeren van taken binnen softwareprocessen die veilig kunnen worden herschikt of parallel kunnen worden uitgevoerd zonder de bestaande softwarestructuur te wijzigen. De verfijning maakt een diepgaandere prestatieanalyse mogelijk en brengt mogelijkheden voor parallelisme aan het licht die cruciaal zijn voor het verbeteren van de prestaties van softwarewerklasten op moderne multicore-CPU's binnen de rekensubsystemen. Experimentele validatie bevestigt dat simulaties op basis van het verfijnde model meetbare prestatieverbeteringen zichtbaar maken.