Pengembangan Sistem Pengontrolan *Gantry Crane* Berbasis Teknik Kembaran Digital dan Pengontrol Adaptif Untuk Meningkatkan Kinerja Tracking dan Mereduksi Sway

Riset Unggulan ITB

Y. Y. Nazaruddin, Valentino, A. Widyotriatmo, V. Nadhira, dan M. I. Mandasari

Progam Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri

Abstrak

Model dapat didefinisikan sebagai kembaran digital (*Digital Twin (DT)*) jika model mampu melakukan rekontruksi variabel keadaan yang divalidasi dengan hasil pengukuran oleh sensor. Selama proses rekontruksi, kembaran digital khususnya pada *gantry crane* memiliki parameter yang berubah terhadap waktu, seperti massa kontainer yang diangkut. Pada penelitian ini, diusulkan kerangka operasi otonom berbasis hukum fisika yang mengintegrasikan pemodelan, sinkronisasi, hingga pemantauan kepercayaan. Model *gantry crane* diturunkan dalam bentuk matriks sehingga model memiliki properti yang dapat dijadikan sebagai batasan pada parameter. Kemudian, Parameter sistem diidentifikasi melalui optimasi *grey-box* dan disinkronkan dengan sistem fisik menggunakan *metode Unscented Kalman Filter*. Keandalan kembaran digital dipantau melalui kovarians estimasi (P) secara kontinu dan uji *Normalized Innovation Squared* (NIS) secara periodik. Hasil pemantauan menentukan tindakan sinkronisasi dan pembaruan parameter secara otonom. Pada pengujian yang dilakukan, pembaruan parameter massa kontainer pada model mampu meningkatkan kemampuan rekontruksi sudut ayun dengan rata-rata RMSE sudut *ayun* menurun dari 3,7° menjadi 0,8°, atau sekitar 78%.

Keyword: kembaran digital, *gantry crane*, UKF, pemantauan kepercayaan, optimasi *grey-box*.

Pendahuluan

Keandalan *digital twin* pada *gantry crane* ditentukan oleh kemampuannya dalam merekontruksi dinamika sistem fisik secara akurat seiring perubahan kondisi operasi. Parameter yang dapat berubah terhadap waktu, seperti massa kontainer dapat menyebabkan penyimpangan respons antara model virtual dan sistem fisik. Permasalahan ini menjadi lebih kompleks ketika estimasi melibatkan parameter yang saling berkaitan dan pengukuran dari sensor dengan waktu sampling berbeda. Kemudian, proses identifikasi dapat dilakukan secara tepat jika batas nilai parameter yang bermakna fisis diketahui. Di sisi lain, ketidakpastian estimasi dan kualitas informasi pengukuran perlu dievaluasi agar keputusan sinkronisasi dapat membedakan adanya perubahan model dengan adanya kesalahan pengukuran akibat noise.

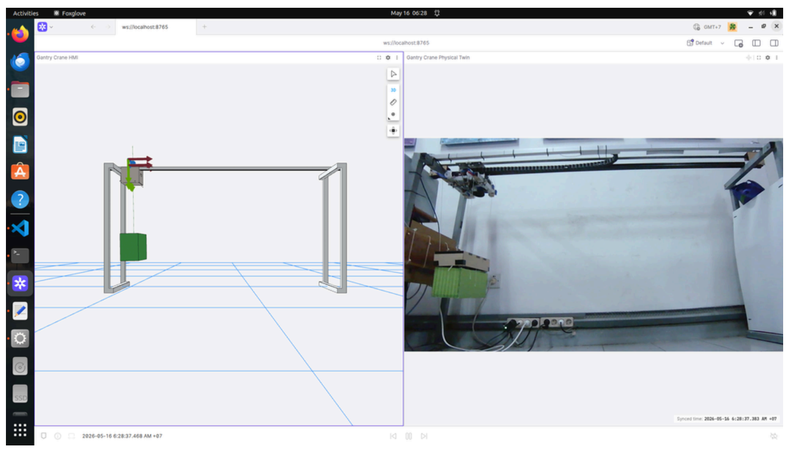
Penelitian ini mengembangkan kerangka *physics-based digital twin* yang memiliki kemampuan pengambilan keputusan secara otonom pada *gantry crane*. Model matriks berbasis Lagrangian dapat dimanfaatkan untuk merumuskan batasan fisik dalam identifikasi parameter yang akan dijaga dengan metode *Unscented Kalman Filter* (UKF) saat sinkronisasi variabel keadaan berdasarkan pengukuran sensor. Kepercayaan terhadap representasi virtual dievaluasi menggunakan kovarians estimasi (P) sebagai indikator kontinu ketidakpastian dan *Normalized Innovation Squared* (NIS) sebagai indikator periodik konsistensi statistik pengukuran. Informasi tersebut digunakan dalam mekanisme keputusan otonom untuk menentukan kebutuhan sinkronisasi dan pembaruan parameter model.

Metodologi

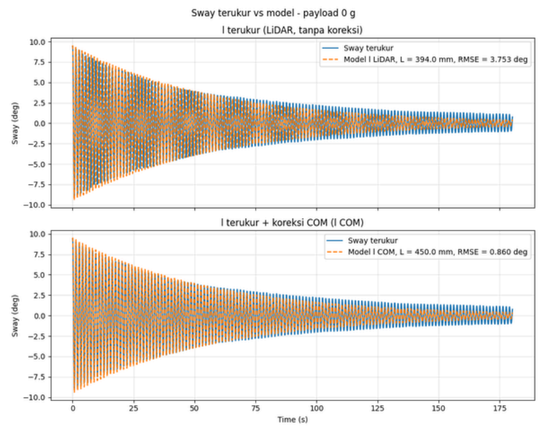
Digital twin yang tersinkronisasi merupakan kemampuan model dalam merekontruksi variabel keadaan dengan hasil yang mirip terhadap data pengukuran oleh sensor secara *real-time*. Model dinamika ini diturunkan dengan *Euler-Lagrange* yang disusun dalam formula matriks (D), (C), dan (g) dengan batasan fisik untuk menjaga validitas parameter selama perubahan massa beban. Penelitian dilaksanakan melalui lima tahap, yaitu:

1. Pemodelan,
2. Identifikasi Parameter,
3. Sinkronisasi Dinamika Awal,
4. Pemantauan kepercayaan, dan
5. Pengambilan tindakan otonom.

Pengujian eksperimental dilakukan dengan tiga variasi massa beban kontainer, yaitu 0, 500, dan 1000 gram dengan masing-masing variasi diulang sebanyak dua kali. Evaluasi pertama difokuskan untuk memetakan relasi antara variabel keadaan terhadap parameter massa pengujian. Kemudian, relasi matematis dapat diperoleh dengan melakukan optimasi terhadap data sensor. Setelah relasi diketahui, kemampuan rekontruksi variabel keadaan pada kembaran digital dapat dievaluasi melalui rekontruksi *open-loop* menggunakan keadaan awal hasil estimasi UKF, dengan horizon prediksi 1 s dan 5 s. Pengujian mencakup dua skenario operasi, yaitu pergerakan troli tanpa aktivitas *hoisting* dan aktivitas *hoisting* tanpa pergerakan troli. Hasil rekontruksi dibandingkan dengan dinamika sistem terukur untuk mengevaluasi kemampuan kembaran digital dalam mempertahankan sinkronisasi variabel keadaan selama interval yang ditentukan. Selain itu, hasil pemantauan kepercayaan dan keputusan otonom ditampilkan kepada operator melalui visualisasi perubahan parameter terhadap waktu seperti pada Gambar 1, sehingga perubahan massa yang terestimasi dan respons kembaran digital dapat diamati secara *real-time*.



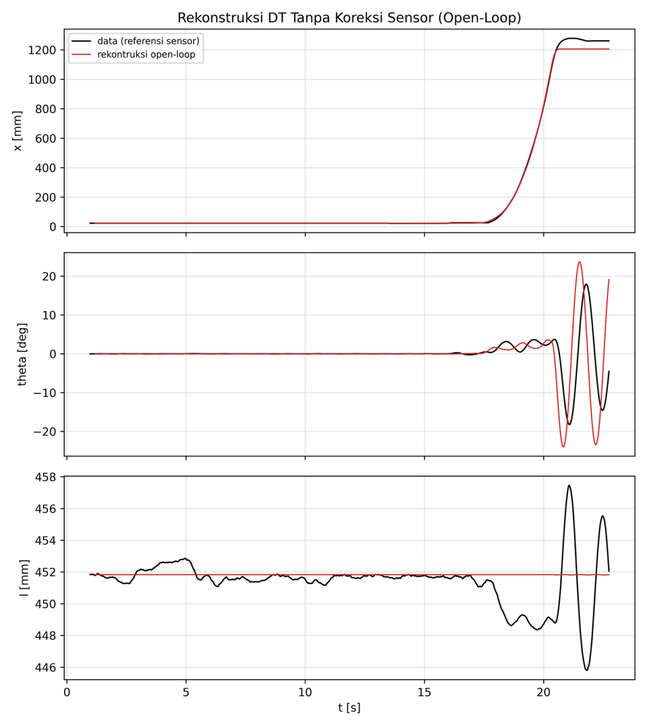
Gambar 1. Tampilan Kembaran Digital dan Sistem Fisik Gantry Crane



Gambar 2. Pengaruh Adaptasi Parameter Massa terhadap Sudut Ayun Kontainer

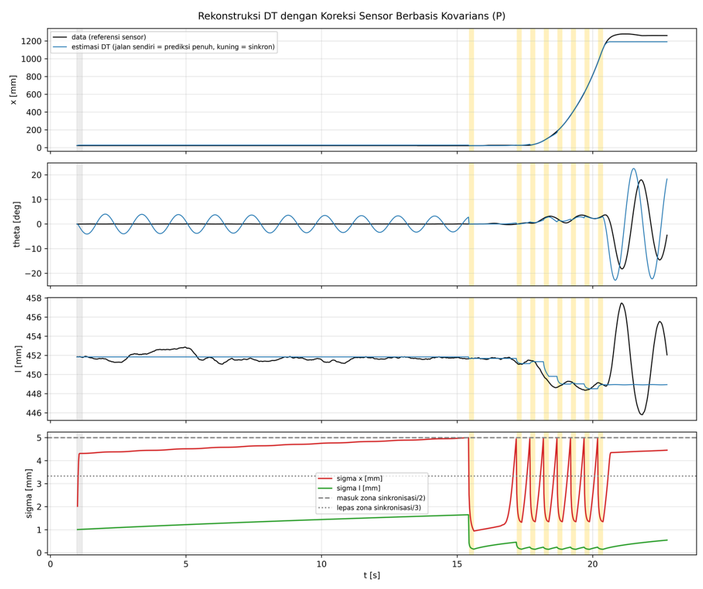
Hasil dan Diskusi

- **Model menjadi lebih akurat dengan pembaruan parameter model.** RMSE sudut ayun turun dari 3,7° menjadi 0,8° (Gambar 2).
- **UKF merekonstruksi dinamika *crane* secara *real-time*.** Posisi troli, sudut ayun, dan panjang tali terhadap data sensor (Gambar 3).



Gambar 3. Rekontruksi Kembaran Digital dan Respon Sistem Fisik Gantry Crane

- **Kovarians (P) menunjukkan seberapa yakin DT berjalan mandiri.** Pada Gambar 4, area kuning menandai saat P mencapai batas ambang dan DT disinkronkan, berbeda dengan Gambar 3 yang berjalan tanpa sensor.



Gambar 4. Pemantauan Uncertainty-Aware dengan P sebagai indikator kepercayaan DT (area kuning = sinkron sensor).

Kesimpulan

1. DT berbasis model fisika dengan UKF mampu merekonstruksi dinamika *gantry crane* secara *real-time*.
2. Pembaruan parameter model meningkatkan akurasi rekonstruksi DT.
3. Kovarians estimasi (P) digunakan sebagai indikator tingkat kepercayaan, sehingga DT mampu mengambil keputusan untuk beroperasi mandiri atau menerima koreksi sensor.
4. Pengembangan selanjutnya difokuskan pada optimasi P dan integrasi NIS untuk mewujudkan operasi otonom DT yang andal.