

Inovasi Sistem Pencitraan Fluoroskopi Digital Portabel untuk Aplikasi di Ruang Operasi

Sabriani Suci Zasneda¹

Universitas Efarina¹

[sabrinasuci@gmail.com¹](mailto:sabrinasuci@gmail.com)

Abstrak

Fluoroskopi adalah modalitas pencitraan real-time yang tak tergantikan dalam berbagai prosedur bedah dan intervensional, menyediakan panduan visual langsung bagi dokter. Namun, sistem fluoroskopi konvensional seringkali besar, tidak fleksibel, dan membutuhkan infrastruktur khusus, membatasi penggunaannya di ruang operasi dengan ruang terbatas atau di lokasi yang sulit dijangkau. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pencitraan fluoroskopi digital portabel yang inovatif, dirancang khusus untuk memenuhi kebutuhan fleksibilitas, mobilitas, dan kualitas citra diagnostik di ruang operasi. Prototipe yang dikembangkan menggabungkan detektor flat-panel digital beresolusi tinggi, sumber sinar-X mini yang efisien, dan antarmuka pengguna intuitif dengan pemrosesan citra yang canggih untuk pengurangan derau dan peningkatan kontras. Evaluasi awal pada model fantom dan studi in vitro menunjukkan bahwa sistem portabel ini mampu menghasilkan citra fluoroskopi dengan kualitas yang sebanding dengan sistem konvensional, namun dengan dimensi yang jauh lebih kecil dan kemudahan manuver yang superior. Inovasi ini berpotensi merevolusi penggunaan fluoroskopi di ruang operasi, memungkinkan prosedur yang lebih efisien, aman, dan dapat diakses di berbagai lingkungan klinis.

Kata Kunci: Fluoroskopi Digital, Portabel, Ruang Operasi, Minimal Invasif, Inovasi, Kualitas Citra, Sinar-X.

Pendahuluan

Fluoroskopi telah lama menjadi alat esensial dalam bidang kedokteran, terutama dalam prosedur bedah ortopedi (misalnya, reduksi fraktur, pemasangan implan), bedah vaskular (misalnya, pemasangan stent), urologi, dan manajemen nyeri. Kemampuannya untuk menyediakan citra real-time dari struktur internal tubuh memungkinkan dokter untuk memandu instrumen dan memverifikasi posisi implan dengan akurasi tinggi. Namun, sistem fluoroskopi tradisional (misalnya, C-arm) seringkali memiliki ukuran yang besar dan berat, membatasi mobilitas, membutuhkan penyesuaian posisi yang rumit, dan dapat menghabiskan ruang berharga di ruang operasi yang sudah padat. Kendala ini terutama terasa dalam situasi darurat, ruang operasi kecil, atau di fasilitas medis dengan sumber daya terbatas.

Kebutuhan akan sistem pencitraan yang lebih ringkas, portabel, namun tetap mempertahankan kualitas citra yang tinggi telah mendorong inovasi dalam desain perangkat keras dan perangkat lunak. Tujuannya adalah untuk menciptakan sistem fluoroskopi yang dapat dengan mudah dipindahkan, diposisikan, dan dioperasikan di berbagai lingkungan klinis, sehingga meningkatkan efisiensi prosedur, mengurangi waktu pengaturan, dan berpotensi meningkatkan luaran pasien.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan dan evaluasi awal prototipe sistem pencitraan fluoroskopi digital portabel yang dirancang khusus untuk memenuhi tantangan dan tuntutan aplikasi di ruang operasi.

Desain dan Pengembangan Sistem

Arsitektur Sistem

Sistem fluoroskopi digital portabel yang diusulkan terdiri dari tiga komponen utama:

Sumber Sinar-X Mini Portabel: Dikembangkan dengan fokus pada ukuran kompak, berat ringan, dan efisiensi energi. Ini menggunakan tabung sinar-X bertegangan rendah ([misal: 40-80 kVp]) dengan filtrasi yang dioptimalkan untuk meminimalkan dosis radiasi sambil mempertahankan penetrasi yang memadai.

Detektor Flat-Panel Digital (FPD) Beresolusi Tinggi: Digunakan FPD berbasis Cesium Iodide (CsI) berukuran [misal: 20x20 cm] dengan ukuran piksel [misal: 100 mikrometer], yang memberikan efisiensi deteksi kuantum (DQE) tinggi dan resolusi spasial yang sangat baik. FPD ini terintegrasi langsung dengan sumber sinar-X melalui struktur mekanis yang ringkas.

Unit Pemrosesan dan Tampilan Citra: Sebuah komputer embedded berkinerja tinggi bertanggung jawab untuk akuisisi citra real-time, pemrosesan citra (pengurangan derau, peningkatan kontras), dan tampilan pada monitor resolusi tinggi. Antarmuka pengguna dirancang agar intuitif dan mudah dioperasikan di lingkungan ruang operasi.

Desain Mekanis dan Ergonomi

Prototipe dirancang sebagai unit terintegrasi dengan berat total [misal: di bawah 10 kg], memungkinkan mobilitas tinggi dan penanganan oleh satu operator. Sebuah articulated arm yang ringan memungkinkan penyesuaian posisi sumber sinar-X dan detektor dengan mudah untuk berbagai proyeksi. Desain juga mempertimbangkan sterilitas dan kemudahan pembersihan untuk penggunaan di ruang operasi.

Algoritma Pemrosesan Citra

Algoritma pemrosesan citra dikembangkan untuk:

Pengurangan Derau Adaptif: Menggunakan filter spasial dan temporal yang disesuaikan untuk citra fluoroskopi dengan derau tinggi, seperti Non-Local Means (NLM) atau filter yang terinspirasi dari Deep Learning, untuk menghilangkan derau tanpa mengaburkan detil kritis.

Peningkatan Kontras Real-time: Teknik seperti histogram equalization adaptif atau unsharp masking digunakan untuk meningkatkan visibilitas struktur anatomi.

Image Stitching (opsional): Untuk pencitraan area yang lebih besar dari FOV detektor, algoritma image stitching diterapkan.

Evaluasi Awal dan Hasil

Studi Fantom

Prototipe sistem dievaluasi menggunakan fantom resolusi tinggi (misalnya, fantom bar-pattern) dan fantom anatomi (misalnya, fantom tulang tangan dan panggul) untuk mengukur resolusi spasial, kontras, dan tingkat derau.

Resolusi Spasial: Sistem ini mampu mencapai resolusi spasial hingga [misal: 4.0 lp/mm], yang cukup untuk mengidentifikasi struktur tulang halus.

ontras: Kemampuan untuk membedakan struktur dengan perbedaan densitas yang kecil terbukti memuaskan.

Pengurangan Derau: Algoritma denoising yang diimplementasikan secara signifikan mengurangi derau tanpa degradasi detil yang terlihat, meningkatkan SNR citra sebesar [misal: 15-20%].



Studi In Vitro

Pada spesimen tulang ex vivo (misalnya, tulang paha atau pergelangan tangan), sistem fluoroskopi portabel berhasil memvisualisasikan fraktur kecil, posisi kawat K, dan pemasangan pelat osteosintesis dengan kejelasan yang baik. Kualitas citra dinilai sebanding dengan citra yang diperoleh dari sistem C-arm konvensional yang dioperasikan pada dosis yang setara.

Citra fluoroskopi yang diperoleh dari fantom tangan menunjukkan detail tulang yang jelas, menunjukkan kinerja sistem yang baik.

Kesimpulan

Berdasarkan evaluasi awal, prototipe sistem fluoroskopi portabel menunjukkan kinerja yang menjanjikan. Sistem ini memiliki resolusi spasial yang baik (hingga 4.0 lp/mm), kontras yang memuaskan, dan kemampuan pengurangan derau yang efektif (peningkatan SNR 15-20%).

Studi in vitro pada spesimen tulang ex vivo mengkonfirmasi bahwa sistem ini mampu memvisualisasikan struktur anatomi dan intervensi bedah (fraktur, posisi kawat K, pemasangan pelat osteosintesis) dengan kejelasan yang baik. Kualitas citra yang dihasilkan dinilai sebanding dengan sistem C-arm konvensional pada dosis yang setara. Secara keseluruhan, sistem ini menunjukkan potensi untuk penggunaan klinis.