Jurnal Ilmiah Matematika

Vol. 12, No. 1, Mei 2025, pp. 28-40 ISSN 2774-3241

http://journal.uad.ac.id/index.php/Konvergensi

Implementasi Transformasi Fourier pada Profilometer Optik Tiga-Dimensi (3-D) dengan Menggunakan Teknik Proyeksi Pola-pola Garis

Margi Sasono ^{a,1,*}, M. Kalim ^{a,2}, Dhea Aura Nabitha ^{a,3}

^{*}^a Program Studi Fisika Metrologi Material Elektronik dan Instrumentasi (Melins), Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia;

¹ margi.sasono@fisika.uad.ac.id; ² moh1800014013@webmail.uad.ac.id; ³ dhea1900014040@webmail.uad.ac.id *Correspondent Author

Received:

Fringes Projection

Revised:

Accepted:

KATAKUNCI	ABSTRAK
Transformasi Fourier Algoritma FFT Profilometer Optik Tiga Dimensi (3-D) Proyeksi Pola-pola garis deng peng Fast pola impl simu simu keywords Fourier Transform FFT Algorithm Datafilometer	Pencitraan optik secara non-kontak untuk pengukuran dan pengetahuan profil permukaan obyek riil 3-D sangat penting dalam bidang industri dan medis. Di antara beberapa teknik pencitraan optik, profilometer optik dengan teknik proyeksi pola-pola garis periodik menjanjikan untuk dikembangkan lebih lanjut. Pola-pola ini mirip dengan sinyal, sehingga teknik yang biasa digunakan dalam pengolahan sinyal digital seperti transformasi Fourier atau algoritma Fast Fourier Transform (FFT) dapat diterapkan untuk mengolah pola- pola garis ini. Makalah ini membahas dan mendemonstrasikan implementasi algoritma FFT untuk profilometer optik, baik dengan simulasi komputer maupun eksperimen di laboratorium. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa algoritma FFT sangat layak dan handal dalam merekonstruksi citra 3-D dari suatu bentuk permukaan obyek riil yang sedang diuji. Ke depan profilometer optik dengan proyeksi pola-pola garis periodik dan algoritma FFT dapat dikembangkan menjadi sebuah perangkat pencitraan optik yang baru untuk misalwa membuat dokumen digital citra 3-D dari song baru
	untuk misalnya membuat dokumen digital citra 3-D dari seni topeng atau relief suatu candi.
	Implementation of Fourier Transform on Three-Dimensional
Optics	(3-D) Optical Profilometer by Using Fringe Patterns
Three Dimension (3-D)	Projection Technique

Non-contact optical imaging for the measurement and knowledge of surface profiles of 3-D real objects is of great importance in the industrial and medical fields. Among several optical imaging techniques, optical profilometers with periodic fringe patterns projection techniques are promising for further development. These patterns are similar to signals, so techniques commonly used in digital signal processing such as Fourier transform or Fast Fourier Transform (FFT) algorithms can be applied to process these fringe patterns. This paper discusses and demonstrates the implementation of the FFT algorithm for optical profilometers, both by computer simulation and laboratory experiments. The simulation and experimental results show that the FFT algorithm is very feasible and reliable in reconstructing a 3-D image of a real object surface shape under test. In the future, the optical profilometer with the projection of periodic fringe patterns and the FFT algorithm can be developed into a new optical imaging device to, for example, create digital documents of 3-D images of mask art or temple reliefs.



jk_math@uad.ac.id

This is an open-access article under the CC–BY-SA license.



Pendahuluan

Pengukuran bentuk obyek riil tiga-dimensi (3-D) secara non-kontak dengan mengunakan teknik pencitraan (*imaging*) optik merupakan aplikasi penting dalam bidang industri [[1][2][3] dan medis [4][5]. Ada beberapa teknik optik untuk mengukur profil (profilometer) dari sebuah bentuk permukaan riil obyek 3-D. Moire Topography [6] dan Perubahan-Fase Profilometer [7] adalah dua contoh dari teknik ini. Namun, profilometer optik menggunakan proyeksi pola-pola garis adalah paling menarik dan menjanjikan untuk dikembangkan. Polapola garis memiliki struktur yang teratur atau periodik, sehingga lebih mudah untuk dianalisa secara matematik. Memproyeksikan pola-pola ini pada suatu permukaan obyek riil 3-D akan menghasilkan sebuah perubahan atau pergeseran garis secara lateral yang dapat diestimasi dan dihitung secara matematik. Pergeseran garis ini membawa informasi penting tentang bentuk permukaan (topografi) dari suatu permukaan obyek riil 3-D yang sedang diuji. Konsep matematika transformasi Fourier atau algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) dapat diterapkan untuk mengestimasi nilai pergeseran pola-pola garis ini [8]. Sistem optik yang tersusun atas kombinasi antara proyeksi pola-pola garis dengan analisa FFT ini sering disebut sebagai *Fourier Transform Profilometry* (FTP)[9].



Gambar 1. Ilustrasi pergeseran pola-pola garis.(a) Contoh pola-pola garis variasi gelapterang (belang-belang). (b) Contoh pergeseran pola-pola garis relatif terhadap (a). (c) Plot perbedaan profil intensitas 1-D (sinyal sinusoidal) sebelum dan sesudah mengalami pergeseran yang diambil pada posisi yang sama di sepanjang garis horisontal (garis hitam) pada Gambar 1a dan Gambar 1b.

Konsep FTP optik menyandarkan pada interaksi cahaya dengan permukaan obyek riil 3-D, dimana cahaya yang disorotkan (iluminasi) memiliki pola-pola berstruktur periodik. Struktur cahaya ini dapat berbentuk pola-pola garis (variasi gelap-terang) yang diproyeksikan (disorotkan) ke suatu permukaan obyek riil 3-D yang sedang diuji. Pola-pola garis ini dapat dibangkitkan, misalnya dengan sebuah program MATLAB. Gambar 1a menunjukkan contoh pola-pola garis pada bidang dua-dimensi (2-D) dengan variasi gelap-terang atau pola belangbelang. Gambar 1b menunjukkan pola-pola garis yang sama dengan Gambar 1a, namun mengalami pergeseran secara lateral (horisontal). Profil intensitas satu-dimensi (1-D) di sepanjang garis horisontal (garis hitam) yang melintasi Gambar 1a dan Gambar 1b ditunjukkan oleh Gambar 1c. Secara fisis, profil ini mirip dengan sinyal sinusoidal dalam *domain* ruang (misalnya di sepanjang sumbu-x). Dalam konsep sinyal pada umumnya [10], sinyal sinusoidal ini adalah periodik dan memiliki frekuensi-ruang, periode-ruang, intensitas (amplitudo), dan fase. Dikarenakan oleh perlakukan fisis (misalnya mengalami modulasi), sinyal sinusoidal dapat mengalami pergeseran dan akan memiliki sebuah perbedaan fase (beda-fase) dengan sinyal sebelum bergeser (lihat Gambar 1c). Secara konsep, nilai beda-fase ini akan sebanding dengan nilai pergeseran sinyal, dan dapat dinyatakan secara matematik sebagai [1]

$$\Delta \varphi = \left(\frac{2\pi}{p}\right) \Delta x,\tag{1}$$

dimana $\Delta \varphi$ adalah beda-fase (dalam radian), *p* adalah periode-ruang sinyal atau periode-ruang dari pola-pola garis (dalam meter atau piksel), dan Δx menyatakan nilai pergeseran sinyal (dalam meter atau piksel). Persamaan (1) menyatakan secara eksplisit bahwa begitu beda-fase dapat diperoleh, maka nilai pergeseran sinyal sinusoidal (pergeseran pola-pola garis) akan dapat diestimasi dengan mudah. Periode-ruang pola-pola garis dapat ditetapkan atau diketahui sebelumnya dengan merancangnya pada program MATLAB.

Secara teoritis, nilai beda-fase ($\Delta \varphi$) pada Gambar 1c dapat diekstraksi dari kedua sinyal sinusoidal tersebut dengan cara menerapkan transformasi Fourier atau algoritma FFT. Sebuah profil (sinyal) sinusoidal secara umum dapat dinyatakan secara matematik sebagai [1][11]

$$s(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos(\frac{2\pi}{p}x + \varphi(x,y)),$$
(2)

dimana s(x, y) menyatakan intensitas sinyal pada setiap titik (x, y) di bidang Gambar 1a atau Gambar 1d, a(x, y) adalah intensitas sinyal latar (*background*) pada setiap titik (x, y), b(x, y) adalah variasi intensitas sinusoidal atau kontras pola-pola garis pada setiap titik (x, y), p adalah periode-ruang sinyal (periode-ruang pola-pola garis), x adalah titik ruang di sepanjang sumbu-x, dan $\varphi(x, y)$ adalah fase sinyal pada setiap titik (x, y) yang terkait dengan bentuk obyek yang diuji. Persamaan (2) dapat dimodifikasi dengan formula Euler sebagai

$$s(x,y) = a(x,y) + \frac{b(x,y)}{2} \left(e^{i\frac{2\pi}{p}x + \varphi(x,y)} + e^{-i\frac{2\pi}{p}x + \varphi(x,y)} \right),$$
(3)

dimana notasi '*' menyatakan konjugat kompleks. Persamaan (3) dapat diubah sebagai berikut $i^{2\pi}$

$$s(x,y) = a(x,y) + c(x,y)e^{\frac{i\pi x}{p}x} + c^*(x,y)e^{-i\frac{\pi x}{p}x},$$
(4)

dengan

$$c(x,y) = \frac{b(x,y)}{2}e^{i\varphi(x,y)}$$
⁽⁵⁾

$$c^*(x,y) = \frac{b(x,y)}{2} e^{-i\varphi(x,y)},$$
(6)

dimana c(x, y) dan $c^*(x, y)$ pada Perasamaan (5) dan Persamaan (6) adalah pasangan sinyal konjugat. Transformasi Fourier atau penerapan algoritma FFT pada Persamaan (4) memperoleh spektrum 1-D dalam *domain* frekuensi-ruang. Hasil spektrum ini dapat digambarkan secara matematik sebagai

 $S(f_x, y) = A(f_x, y) + C(f_x - f, y) + C^*(f_x + f, y),$ (7) dengan $S(f_x, y), A(f_x, y),$ dan $C(f_x, y)$ menyatakan spektrum FFT dan f_x adalah frekuensi-ruang di sepanjang sumbu-x, dan $f = \frac{1}{p}$ adalah frekuensi-ruang yang terkait dengan periode-ruang pdari pola-pola garis sebagaimana yang dinyatakan pada Persamaan (2).

Margi Sasono, M. Kalim, dan Dhea Aura Nabitha Implementasi Transformasi Fourier pada ...)



Gambar 2. Ilustrasi spektrum FFT suatu sinyal sinusoidal.

Gambar 2 menunjukkan ilustrasi spekrum FFT sinyal sinusoidal sebagaimana yang dinyatakan oleh Persamaan (7). Spektrum FFT dipisahkan oleh frekuensi-ruang, dimana a(x,y), b(x,y), dan c(x,y) memiliki variasi ruang lebih pelan atau lebih kecil jika dibandingkan dengan frekuensi-ruang (f). Dari tinjauan konsep sinyal, spektrum FFT dari suatu sinyal sinusoidal dibagi menjadi tiga komponen yang terpisah satu sama lainnya. Spektrum $A(f_x, y)$ menyatakan spektrum nol (intensitas sinyal dengan frekuensi-ruang nol). Spektrum nol bersesuaian dengan komponen latar (background) atau intensitas konstan (komponen DC sinyal). Sementara itu spektrum $C(f_x - f, y)$ dan $C^*(f_x + f, y)$ menyatakan variasi periodik intensitas sinyal (komponen AC sinyal) dan mengandung informasi tentang bentuk obyek riil 3-D yang diuji. Fase sinyal dapat diestimasi dengan mengambil hanya salah satu dari kedua spektrum ini, misalnya hanya $C(f_x - f, y)$. Dalam konsep pengolahan sinyal, pengambilan ini dapat dengan mudah dilakukan dengan cara menerapkan suatu filter dalam domain frekuensi-ruang, misalnya filter Gaussian [12]. Untuk mengembalikan sinyal dari domain frekuensi-ruang (f) kembali ke domain ruang (x), transformasi Fourier balik (inverse transformation Fourier atau IFFT) diterapkan pada komponen spektrum terfilter tersebut. Hasil IFFT ini adalah sebuah sinyal bentuk kompleks dan secara matematik dapat dinyatakan sebagai

$$\hat{c}(x,y) = \frac{b(x,y)}{2} e^{i(\frac{2\pi}{p}x + \varphi(x,y))},$$
(8)

dengan $\hat{c}(x, y)$ adalah sinyal kompleks. Secara matematik, fase dari Persamaan (8) dapat dihitung sebagai

$$\phi(x,y) = \arctan(\frac{IM[\hat{c}(x,y)]}{RE[\hat{c}(x,y)]}),$$
(9)

dengan $\phi(x, y) = \frac{2\pi}{p}x + \phi(x, y)$ adalah fase yang dicari, $IM[\hat{c}(x, y)]$ dan $RE[\hat{c}(x, y)]$ adalah berturut-turut menyatakan bagian imaginer dan riil dari Persamaan (8). Akan tetapi, dikarenakan fungsi trigonometri arctan, secara matematik nilai fase $\phi(x, y)$ dari Persamaan (9) hanya memiliki jangkauan nilai $[-\pi, \pi]$. Nilai fase yang demikian ini sering disebut sebagai fase terbungkus (*wrapped*) atau fase diskontinu [7]. Dengan algoritma *unwrapping* yang tepat, seperti menggunakan algoritma Itoh [13], fase kontinu (fase sebenarnya) dapat diperoleh. Berdasarkan Persamaan (2) dan Persamaan (9) perbedaan fase (beda-fase) antara sinyal (pola-pola garis) sinusoidal sebelum dan sesudah mengalami pergeseran (Gambar 1c) dapat diperoleh. Beda-fase kontinu ini membawa informasi tentang bentuk obyek riil 3-D yang sedang diuji.

Makalah ini membahas dan mendemonstrasikan implementasi transformasi Fourier (algoritma FFT) pada prinsip profilometer optik 3-D. Komparasi antara hasil simulasi komputer dan hasil eksperimen ditunjukkan. Pada simulasi komputer, algoritma FFT diterapkan pada profilometer optik untuk merekonstruksi bentuk permukaan suatu obyek uji simulasi yang dibangkitkan dengan sebuah program MATLAB. Hasil simulasi komputer diverifikasi dengan melakukan eksperimen profilometer optik di dalam sebuah laboratorium. Sebuah obyek riil 3-D yang terbuat dari plastisin diiluminasi (disorot) dengan cahaya berpolapola garis yang berasal dari sebuah perangkat komersial proyektor LCD (*Liquid Crystal Device*). Pola-pola garis ini dibangkitkan dengan sebuah program MATLAB, dan melalui koneksi proyektor LCD ke unit komputer disorotkan ke permukaan obyek 3-D yang diuji. Sebuah kamera digital yang juga terkoneksi ke komputer digunakan untuk menangkap citra (gambar) pola-pola garis, baik sebelum (referensi) dan sesudah ada obyek (pergeseran atau distorsi). Algoritma FFT diterapkan titik demi titik (atau setiap piksel) di seluruh data piksel pada kedua citra digital yang tertangkap oleh kamera digital ini. Dengan cara ini, peta beda-fase dapat ditampilkan dalam bentuk citra 2-D dan 3-D. Diharapkan hasil simulasi dan eksperimen ini menjadi dasar untuk merancang-bangun sebuah perangkat prototipe profilometer optik 3-D lebih jauh. Ke depan, perangkat ini dapat diterapkan misalnya untuk membuat dokumen arsip citra 3-D dari suatu karya seni topeng atau relief suatu candi [14][15].

Metode

Prinsip utama profilometer optik 3-D menyandarkan pada diagram skematik Gambar 3a, dimana secara teknis membutuhkan dua komponen optik yaitu proyektor LCD dan kamera digital yang keduanya dapat dikoneksikan ke sebuah unit komputer. Program MATLAB membangkitkan pola-pola garis periodik dengan periode p = 63 piksel. Proyektor LCD menyorotkan pola-pola garis ini ke bidang referensi (sebelum disorotkan ke obyek). Kamera digital menangkap citra pola-pola garis ini, dan komputer menyimpan citra ini sebagai sebuah citra referensi. Dalam kondisi yang sama, selanjutnya sebuah obyek riil 3-D yang diuji diletakkan di atas bidang referensi, dan kembali kamera digital menangkap sebuah citra polapola garis yang sudah bergeser akibat variasi ketinggian dari permukaan obyek. Komputer menyimpan citra ini sebagai sebuah citra distorsi. Selanjutnya, ekstraksi beda-fase antara kedua citra dilakukan dengan menerapkan algoritma FFT. Semua proses pengolahan citra, baik simulasi dan eksperimen dilakukan dengan menggunakan program MATLAB. Prosedur algoritma FFT ditunjukkan pada Gambar 4. Prosedur dimulai dengan menerapkan transformasi Fourier baris demi baris data piksel (atau pada setiap profil sinyal sinusoidal 1-D) pada kedua citra. Dengan menggunakan filter yang tepat, spektrum nol (intensitas DC) terlebih dahulu dihilangkan dari sinyal sinusoidal. Langkah berikut, sebuah filter Gaussian diterapkan untuk memilih salah satu spektrum yang mengandung informasi tentang obyek yang diuji. Spektrum yang terseleksi selanjutnya ditransformasikan Fourier balik (IFFT) ke domain ruang untuk menghasilkan sinyal sinusoidal dalam bentuk kompleks. Dengan menggunakan Persamaan (9) fase terbungkus (wrapped) diperoleh dari kedua citra. Untuk menghasilkan fase kontinu, proses unwrapping dilakukan dengan memanfaatkan fungsi bawaan di dalam MATLAB 'unwrap function' [16]. Pengurangan fase kontinu pada kedua citra referensi dan distorsi menghasilkan beda-fase yang sebanding dengan profil 3-D dari obyek yang sedang diuji.



Gambar 3. Diagram skematik prinsip kerja profilometer optik 3-D.



Gambar 4. Prosedur ekstraksi fase dengan menerapkan transformasi Fourier (algoritma FFT) untuk profilometer optik 3-D, dimana spektrum nol terlebih dahulu dihilangkan dengan suatu filter yang tepat.

Hasil dan Pembahasan

1. Simulasi Komputer

Simulasi ini menggunakan obyek uji sebuah citra bentuk belah-ketupat (ukuran 1080 x 1920 piksel) yang dibangkitkan dengan program MATLAB, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5a. Program MATLAB juga membangkitkan citra pola-pola garis (citra dengan intensitas *gray level*) sebagai citra referensi dengan periode-ruang p = 63 piksel, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 5b. Untuk menghasilkan citra distorsi, citra Gambar 5a dan Gambar 5b diinterferensikan dengan operasi penjumlahan citra. Hasil citra distorsi ini ditunjukkan pada Gambar 5c. Nampak jelas pada Gambar 5c bahwa pola-pola garis, khususnya pada daerah bentuk belah-ketupat, mengalami pergeseran garis relatif terhadap pola-pola garis citra referensi. Plot grafik intensitas terhadap posisi piksel (hanya 100 data yang ditampilkan) dari kedua profil 1-D (sinyal sinusoidal) yang diambil masing-masing pada posisi baris piksel ke-500 pada Gambar 5b dan Gambar 5c ditunjukkan pada Gambar 5d. Secara visual, pergeseran pola-pola garis yang sebanding dengan nilai beda-fase antara sinyal sinusoidal referensi dan distorsi tersebut nampak cukup jelas teramati.



Gambar 5. Simulasi komputer prinsip profilometer optik 3-D. (a) Obyek simulasi. (b) Citra pola-pola referensi. (c) Citra distorsi hasil penjumlahan citra gambar (a) dan (b). (c) Plot grafik intensitas terhadap posisi piksel (hanya 100 data yang ditampilkan) dari kedua profil 1-D (sinyal sinusoidal) yang diambil masing-masing pada posisi baris piksel ke-500 pada Gambar 5b dan Gambar 5c.

Gambar 6a dan Gambar 6b berturut-turut menunjukkan spektrum hasil penerapan algoritma FFT pada sinyal sinusoidal referensi dan distorsi (setelah spektrum nol dihilangkan). Sebuah filter Gaussian (kurva warna biru) diterapkan. Penerapan IFFT pada kedua spektrum terseleksi ini menghasilkan sinyal kompleks (untuk mempersingkat, plot sinyal ini tidak ditunjukkan pada gambar di dalam makalah ini). Hasil ekstraksi fase terbungkus dan kontinu setelah *proses unwrapping* dari kedua sinyal sinusoidal berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 6c untuk referensi dan Gambar 6d untuk distorsi. Nampak bahwa fase terbungkus yang ditunjukkan dengan kurva (i) memiliki nilai terbatas hanya pada nilai [$-\pi, \pi$]. Sementara fase kontinu yang ditunjukkan dengan kurva (ii) menunjukkan kecenderungan linear sebagaimana ini sesuai dengan karakter fase pada Persamaan (2). Nampak bahwa Gambar 6c dan Gambar 6d tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Ini berarti bahwa nilai bedafase memiliki nilai yang kecil sehingga tidak dapat dihitung (teramati) secara visual.



Gambar 6. Penerapan algoritma FFT pada simulasi komputer prinsip profilometer optik 3-D. (a) Spektrum FFT untuk sinyal sinusoidal referensi. (b) Spektrum FFT untuk sinyal sinusoidal distorsi. Plot bersama antara fase terbungkus kurva (i) dan fase kontinu kurva (ii) untuk (c) sinyal referensi dan (d) sinyal distorsi.



Gambar 7. Hasil rekonstruksi citra pada simulasi komputer prinsip profilometer optik 3-D. (a) Citra referensi terbungkus. (b) Citra distorsi setelah ada obyek simulasi berbentuk belahketupat. (e) Hasil simulasi rekonstruksi citra beda-fase 2-D hasil pengurangan (d) terhadap (c). (f) Hasil simulasi rekonstruksi citra beda-fase 3-D.

Algoritma FFT (prosedur Gambar 4) diterapkan baris demi baris pada seluruh data piksel baik pada citra referensi maupun distorsi untuk menghasilkan profil 2-D maupun 3-D dari obyek simulasi belah ketupat yang sedang diuji. Hasil citra 2-D fase terbungkus untuk sinyal referensi dan distorsi ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 7a dan Gambar 7b. Nampak bahwa pada kedua citra ada perbedaan yang signifikan dengan citra sebelum diterapkan algoritma FFT (Gambar 5b dan Gambar 5c). Distribusi fase kontinu (rekonstruksi citra fase 2-D) ditunjukkan pada Gambar 7b untuk referensi dan Gambar 7c untuk distorsi. Nampak bahwa kedua citra fase kontinu ini sekilas tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Namun , jika dilakukan pengurangan Gambar 7c terhadap Gambar 7d, maka diperoleh sebuah citra bedafase kontinu 2-D yang menggambarkan bentuk obyek simulasi belah ketupat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7e. Sementara Gambar 7f menunjukkan rekonstruksi citra dalam bentuk 3-D. Dalam citra ini nampak bahwa bentuk belah-ketupat 3-D secara visual cukup jelas dan dapat diamati dengan baik, meskipun teramati bahwa rekonstruksi ini tidak akurat terutama pada bagian tepi obyek (bagian obyek dengan sudut tajam). Namun demikian, secara umum hasil simulasi ini menunjukkan bahwa penerapan algoritma FFT (transformasi Fourier) untuk prinsip kerja profilometer optik 3-D dapat bekerja cukup akurat untuk membuat (merekonstruksi) citra 3-D mirip dengan obyek simulasi (Gambar 5a).

2. Eksperimen Profilometer Optik 3-D

Hasil simulasi komputer diverifikasi dan dimplementasikan ke dalam sebuah eksperimen riil di laboratorium untuk menguji prinsip kerja profilometer optik 3-D. Dengan merujuk skema pada Gambar 3, susunan eksperimen di dalam ruang laboratorium ditunjukkan pada fotograf Gambar 8a. Proyektor LCD dan lensa kamera diatur pada jarak l_0 = 250 cm dari bidang referensi. Proyektor LCD dan lensa kamera diposisikan sejajar dengan jarak pisah d_0 = 45 cm. Eksperimen ini menggunakan perangkat proyektor LCD model Epson EB-W06 WXGA 3LCD dengan resolusi citra (1200 x 800) piksel dan iluminasi cahaya putih 3700 lumen. Kamera digital yang digunakan adalah model Hayear 1080P dengan resolusi citra (1080x 1920) piksel dan ukuran setiap piksel adalah (1,43 x 1,43) µm. Semua perangkat terkoneksi dan dapat dikendalikan secara otomatis melalui komputer. Dalam eksperimen ini, sebuah obyek riil 3-D berbentuk belah-ketupat terbuat dari bahan plastisin digunakan sebagai obyek uji, sebagaimana ditunjukkan oleh fotograf Gambar 8b.



Gambar 8. (a) Setup eksperimen di laboratorium untuk menguji kinerja profilometer optik 3-D. (b) Fotograf obyek riil 3-D yang digunakan dalam eksperimen, dimana obyek berbentuk belah ketupat yang terbuat dari bahan plastisin.



Gambar 9. Citra yang ditangkap oleh kamera digital dalam eksperimen profilometer optik 3-D untuk (a) citra referensi dan (b) citra distorsi setelah obyek riil belah ketupat diletakkan pada bidang referensi. (c) Plot grafik intensitas (*gray level*) terhadap posisi piksel dari kedua profil 1-D (sinyal sinusoidal) yang diambil masing-masing pada posisi baris piksel ke-500 pada gambar (a) dan (b).

Langkah pertama eksperimen adalah proyektor LCD menyorotkan (mengiluminasikan) pola-pola garis yang sama dengan yang digunakan dalam simulasi ke bidang referensi. Gambar 9a menunjukkan citra referensi (intensitas dalam skala *gray*) yang ditangkap oleh kamera digital. Sementara Gambar 9b menunjukkan citra distorsi setelah obyek uji riil 3-D belah ketupat (Gambar 8b) diletakkan pada bidang referensi. Secara visual nampak bahwa pada citra distorsi hasil eksperimen (lihat Gambar 9b) menunjukkan pergeseran pola-pola garis, terutama pada daerah belah-ketupat. Gambar 9c menunjukkan plot bersama profil 1-D intensitas atau sinyal sinusoidal terhadap posisi piksel yang diambil pada posisi baris data piksel ke-500 pada kedua citra baik Gambar 9a maupun Gambar 9b. Nampak jelas bahwa plot hasil eksperimen memiliki perbedaan dengan hasil simulasi (Gambar 5d), terutama diamati pada intensitas maksimum (amplitudo sinyal) yang tidak konstan dikarenakan banyak *noise* yang muncul dalam suatu eksperimen. *Noise* dapat berasal dari beberapa faktor seperti aberasi lensa kamera digital yang digunakan [17]. Namun, nampak jelas bahwa pada plot grafik Gambar 9c menunjukkan ada beda-fase yang teramati secara visual.

Gambar 10a dan Gambar 10b berturut-turut menunjukkan spektrum hasil penerapan algoritma FFT pada sinyal sinusoidal referensi dan distorsi hasil eksperimen (setelah spektrum nol dihilangkan). Sebuah filter Gaussian (kurva warna biru) diterapkan pada salah satu spektrum. Dengan menerapkan IFFT pada kedua spektrum terseleksi, sebuah sinyal kompleks diperoleh (sinyal kompleks ini tidak ditunjukkan pada gambar di dalam makalah ini). Ekstraksi fase terbungkus dan kontinu hasil eksperimen dari kedua sinyal sinusoidal tersebut berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 10c dan Gambar 10d. Secara visual, nampak bahwa fase terbungkus yang ditunjukkan dengan kurva (i) memiliki nilai terbatas hanya pada nilai $[-\pi, \pi]$. Sementara fase kontinu hasil eksperimen yang ditunjukkan dengan kurva (ii) menunjukkan kecenderungan linear mirip dengan hasil simulasi sebelumnya.



Gambar 10. Penerapan algoritma FFT pada eksperimen profilometer optik 3-D. (a) Spektrum FFT untuk sinyal sinusoidal referensi. (b) Spektrum FFT untuk sinyal sinusoidal distorsi. Plot bersama antara fase terbungkus kurva (i) dan fase kontinu kurva (ii) untuk (c) sinyal referensi dan (d) sinyal distorsi.





Penerapan algoritma FFT (prosedur Gambar 4) baris demi baris pada seluruh data piksel, baik citra referensi maupun distorsi, menghasilkan profil 2-D maupun 3-D dari obyek riil belah ketupak plastisin yang sedang diuji secara eksperimen. Gambar 11a dan Gambar 11b berturutturut menunjukkan citra 2-D fase terbungkus dari citra referensi dan distorsi yang diperoleh secara eksperimen. Secara visual, nampak jelas bahwa ada perbedaan yang signifikan antara hasil ekstraksi fase terbungkus secara eksperimen dengan hasil simulasi. Sementara Gambar 11c dan Gambar 11d berturut-turut menunjukkan citra fase kontinu hasil proses unwrapping dari referensi dan distorsi. Meskipun tidak jauh berbeda dengan hasil simulasi, namun citra kontinu hasil eksperimen nampak banyak terjadi noise. Keberadaan noise ini jelas akan mempengaruhi tingkat akurasi dalam ekstraksi beda-fase. Melalui pengurangan Gambar 11d terhadap Gambar 11c diperoleh rekonstruksi citra beda-fase kontinu, sebagaiamana ditunjukkan pada Gambar 11e. Meskipun tidak memiliki akurasi tinggi, namun Gambar 11e menunjukkan sebuah citra 2-D yang mirip dengan bentuk belah ketupat dari obyek riil (Gambar 8b). Rekonstruksi citra 3-D obyek belah ketupak plastisin ditunjukkan pada Gambar 11f. Dalam citra 3-D hasil eksperimen ini nampak bahwa bentuk belah-ketupat 3-D secara visual cukup teramati dengan baik. Namun sesuai dengan hasil simulasi, sudut tajam dari bentuk belah ketupat nampak tidak dapat terekonstruksi dengan akurat. Efek bayangan (shadow) yang teramati pada citra distorsi (Gambar 9b) dapat mereduksi tingkat akurasi algoritma FFT dalam mengekstraksi fase suatu citra (sinyal sinusoidal). Namun secara umum, eksperimen profilometer optik 3-D ini sukses sesuai dengan hasil simulasi komputer. Ini membuktikan bahwa penerapan algoritma FFT (transformasi Fourier) untuk prinsip kerja profilometer optik 3-D dapat bekerja baik dan cukup akurat untuk membuat (merekonstruksi) citra 3-D, baik dari sisi simulasi maupun eksperimen.

Simpulan

Implementasi transformasi Fourier (algoritma FFT) untuk prinsip kerja profilometer optik 3-D telah sukses ditunjukkan dan didemonstrasikan, baik secara simulasi komputer maupun eksperimen. Hasil simulasi komputer menunjukkan bahwa algoritma FFT berkerja akurat untuk profilometer optik 3-D dalam merekonstruksi citra 3-D obyek simulasi berbentuk belah ketupat. Akan tetapi, hasil kurang akurat dalam merekonstruksi bagian-bagian tepi obyek atau bagian obyek dengan sudut tajam. Demikian juga hasil eksperimen profilometer optik 3-D memiliki kendala dalam merekonstruksi bagian tepi obyek dengan akurat. Ketidakakuratan dalam eksperimen banyak dipengaruhi beberapa faktor, seperti aberasi lensa kamera, kestabilan intensitas cahaya yang digunakan, dan juga efek bayangan (*shadow*) dalam citra yang ditangkap oleh kamera. Ke depan kinerja profilometer optik 3-D perlu diperbaiki dalam teknik atau metode dalam merekonstruksi citra. Namun secara umum, algoritma FFT layak dan handal untuk dapat digunakan sebagai dasar matematika dalam melakukan rekonstruksi citra 3-D dalam profilometer optik dengan cara cepat.

Daftar Pustaka

- M. N. Alkhatib, Y. D. Shmelev, O. A. Tyshova, I. V. Sinilshchikov, and A. V. Bobkov, "3D measurement using fringe projection profilometry," *Comput. Opt.*, vol. 47, no. 6, pp. 913–919, 2023, doi: 10.18287/2412-6179-C0-1297.
- [2] S. Lv, D. Tang, X. Zhang, D. Yang, W. Deng, and Q. Kemao, "Fringe projection profilometry method with high efficiency, precision, and convenience: theoretical analysis and development," *Opt. Express*, vol. 30, no. 19, p. 33515, 2022, doi: 10.1364/oe.467502.
- [3] D. K. Lee and B. Y. Park, "A case study for 3D scanning-based quantitative quality control during key stages of composite small craft production," *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 15, p. 100534, 2023, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2023.100534.
- [4] K. Higuchi *et al.*, "Three-dimensional visualization improves the endoscopic diagnosis of superficial gastric neoplasia," *BMC Gastroenterol.*, vol. 21, no. 1, pp. 1–9, 2021, doi:

10.1186/s12876-021-01829-y.

- [5] Z. Wang, R. Yi, X. Wen, C. Zhu, and K. Xu, "Cardiovascular medical image and analysis based on 3D vision: A comprehensive survey," *Meta-Radiology*, vol. 2, no. 4, p. 100102, 2024, doi: 10.1016/j.metrad.2024.100102.
- [6] L. Wang *et al.*, "Computer-generated moiré profilometry based on flat image demodulation," *Opt. Rev.*, vol. 28, no. 5, pp. 546–556, 2021, doi: 10.1007/s10043-021-00686-0.
- [7] X. Meng, F. Wang, J. Liu, M. Chen, and Y. Wang, "Phase shifting profilometry based on Hilbert transform: An efficient phase unwrapping algorithm," *J. Appl. Phys.*, vol. 131, no. 19, 2022, doi: 10.1063/5.0084695.
- [8] S. Wildeman, "Real-time quantitative Schlieren imaging by fast Fourier demodulation of a checkered backdrop," *Exp. Fluids*, vol. 59, no. 6, p. 0, 2018, doi: 10.1007/s00348-018-2553-9.
- [9] B. Li, Y. An, and S. Zhang, "Single-shot absolute 3D shape measurement with Fourier transform profilometry," *Appl. Opt.*, vol. 55, no. 19, p. 5219, 2016, doi: 10.1364/ao.55.005219.
- [10] W. van Drongelen, *LTI Systems*. 2018.
- [11] D. Mahmoud, A. Khalil, and M. Younes, "A single scan longitudinal calibration technique for fringe projection profilometry," *Optik (Stuttg).*, vol. 166, pp. 270–277, 2018, doi: 10.1016/j.ijleo.2018.04.038.
- [12] C. M. Melgoza *et al.*, "Wavelet Analysis Using Hilbert Transform and Matching Algorithm for Radar Receiver System," *2021 IEEE 11th Annu. Comput. Commun. Work. Conf. CCWC 2021*, pp. 233–237, 2021, doi: 10.1109/CCWC51732.2021.9375953.
- [13] M. A. Gdeisat, D. R. Burton, F. Lilley, M. Arevalillo-Herráez, A. Abushakra, and M. Qaddoura, "Shifting of wrapped phase maps in the frequency domain using a rational number," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 10, 2016, doi: 10.1088/0957-0233/27/10/105003.
- [14] G. S. Spagnolo, L. Cozzella, and F. Leccese, "Projected fringes profilometry for cultural heritage studies," 2019 IMEKO TC4 Int. Conf. Metrol. Archaeol. Cult. Heritage, MetroArchaeo 2019, pp. 435–438, 2019.
- [15] B. Satria and A. Franz, "Membangun Aplikasi Pengenalan Topeng Hudoq Berbasis Augmented Reality Dengan Metode Marker Based Tracking," *J. Ilmu Komput. dan Sist. Inf.*, vol. 6, no. September, pp. 103–110, 2023, [Online]. Available: http://ejournal.sisfokomtek.org/index.php/jikom/article/view/1703%0Ahttp://ejournal.sisfo komtek.org/index.php/jikom/article/download/1703/1133.
- [16] F. Gascon and F. Salazar, "Simulation of Rough Surfaces and Analysis of Roughness by MATLAB," MATLAB - A Ubiquitous Tool Pract. Eng., no. February, 2011, doi: 10.5772/22534.
- [17] S. Ortiz, M. A. Mallaiyan Sathiaseelan, and A. Cha, "Time-of-flight camera characterization with functional modeling for synthetic scene generation," *Opt. Express*, vol. 29, no. 23, p. 37661, 2021, doi: 10.1364/oe.438523.