

Analisis Kinematika Balik pada Kendali Robot Lengan *Dental Light* Berbasis Pengolahan Citra Digital Berdasarkan Isyarat Tangan

Saprindo Harun Prabantara*¹, Agus Harjoko²

¹Prodi Elektronika dan Instrumentasi Jurusan Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM

²Jurusan Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM, Yogyakarta

e-mail: *¹nindo.prabantara@gmail.com, ²aharjoko@ugm.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan kemajuan teknologi dalam bidang rekayasa robot manipulator dan pengolahan citra diterapkan dalam penelitian ini. Robot lengan enam DOF digunakan dalam membantu tindakan medis dokter dengan mengotomatisasi gerakan dari dental light berdasarkan isyarat jari tangan dokter lewat penggunaan pengolahan citra. Isyarat jari tangan dikenali sebagai instruksi untuk kemudian diolah sebagai koordinat kartesian. Koordinat yang didapat digunakan untuk mencari sudut sendi manipulator menggunakan algoritma kinematika balik metode analisis aljabar. Penyelesaian diawali dengan menentukan notasi Denavit-Hartenberg dari manipulator dilanjutkan dengan pencarian matriks transformasi homogen tiap sendi. Matriks-matriks diolah untuk mendapatkan solusi sudut sendi dari manipulator. Untuk mempermudah pengendalian ditambahkan subsistem focus pedal yang digunakan untuk mengendalikan gerak dari dua sendi terakhir bagian end-effector.

Uji coba sistem dilakukan terhadap kinerja algoritma kinematika balik dengan hasil selisih pada angka 10^{-3} jika dibandingkan dengan hasil metode referen lain. Uji coba hardware menunjukkan performansi yang baik dengan selisih nilai pada range -1 sampai 2 mm. Waktu eksekusi satu kali looping algoritma kinematika balik berada pada range 207-208 ms, sedangkan eksekusi program subsistem focus pedal berada pada range 36-38 ms. Komunikasi antar ketiga subsistem berjalan baik pada jarak 1 sampai 3.5 meter.

Kata kunci— pengolahan citra digital, DOF, algoritma kinematika balik, metode analisis aljabar, notasi Denavit-Hartenberg

Abstract

The use of technological advances in the field of robot manipulator engineering and image processing was applied in this study. Robotic arm with six DOF is used for helping dental procedures by automatizing the movement of dental light based on dentist hand gesture using image processing. The hand gesture is recognized as an instruction for later use processed as cartesian coordinate. The coordinate is used to find the angle of the manipulator joints uses inverse kinematics algorithm with algebraic analysis method. The solution itself begins by determining Denavit-Hartenberg notation from the manipulator followed by searching of homogenous transformation matrix of each joint. Then, the matrix being calculated to obtain joint displacement solution from the manipulator. For easier control, one focus pedal sub system was added to control the movement of the last two joints of the end-effector.

System testing was done by testing the performance of inverse kinematics algorithm. The difference of those two methods is only 10^{-3} which shows the accuracy of the algorithm. Algorithm testing by hardware shows the good performance too with the difference between axis input value and axis testing value was in -1 to 2 mm range. The time needed for one execution of inverse kinematics algorithm was in 207-208 ms range and the execution of focus

pedal instruction was in 36-38 ms range. Communication of instruction form focus pedal sub system ran well in the range of 1 metre to 3.5 metre.

Keywords—*digital image processing, DOF, inverse kinematics algorithm, analysis algebra method, Denavit-Hartenberg notation*

1. PENDAHULUAN

Dalam dunia kedokteran gigi, dikenal suatu teknologi yang dinamakan *dental light*. *Dental light* merupakan bagian yang digunakan untuk menyorot atau menerangi bagian mulut pasien yang sedang diperiksa. *Dental light* dengan ujung berupa bohlam lampu bermika ditopang oleh lengan berbahan metal dengan beberapa sendi yang memungkinkannya melakukan beberapa gerakan untuk mengakomodir fokus cahaya. Dalam penggunaannya, *dental light* digerakkan menggunakan tangan sampai fokus cahayanya dirasa sesuai dengan posisi periksa yang diperlukan dokter. Cara pengaturan konvensional seperti ini dirasakan cukup merepotkan dan mengurangi kesterilan tangan dokter karena harus menyentuh langsung pegangan dari *dental light*. Selain itu tidak semua dokter gigi didampingi perawat sebagai asisten, padahal dalam melakukan praktiknya tangan dokter haruslah selalu steril.

Di lain bidang, teknologi *image processing*, sebagai salah satu bidang riset pionir dalam pengolahan citra digital, berkembang pesat beberapa tahun belakangan. Kemunculan metode-metode dalam pengenalan pola dan bentuk benda telah dimanfaatkan pada beragam aplikasi kehidupan. Salah satu di antaranya adalah aplikasi pendeteksian arah jari tangan. Aplikasi ini pada umumnya memanfaatkan gerakan dan atau pola tangan dari variasi posisi jari sebagai input yang kemudian diproses. Metode yang dapat dipakai antara lain ekualisasi histogram, kemudian dihaluskan dengan filter Gauss, lalu di-*threshold* untuk menguatkan nilai masing-masing pixel. Pemrosesan dilanjutkan dengan pencarian kontur tangan dan titik tengah tangan. Dari titik tengah tersebut kemudian dapat dicari kesimpulan arah dari isyarat tangan [1]. Untuk lebih mempermudah dan meningkatkan keakuratan proses pendeteksian tangan, dapat digunakan metode konversi citra dari RGB ke HSV [2]. Ruang warna HSV cenderung mirip dengan keberagaman warna kulit manusia. Digunakannya proses konversi ini karena sarung tangan yang biasa digunakan dokter sebagai sampel dalam penelitian memiliki warna dasar yang mirip dengan warna kulit manusia tersebut. Output dari sistem pengolah citra digital kemudian dapat diumpankan ke sistem yang lain yang menerima hasil perintah dari terjemahan aplikasi pendeteksi arah jari tangan.

Teknologi robot sendiri khususnya bidang kendali perangkat keras mengalami perkembangan yang pesat pula. Pada implementasi kendali gerak robot tipe lengan atau sering disebut *manipulator* dikenal istilah kendali gerak kinematika balik atau *inverse kinematics*. Jenis kendali ini digunakan untuk mengontrol gerak dari sebuah *manipulator* untuk menempatkan *end-effector* robot pada posisi dan orientasi yang diinginkan. Kendali ini nantinya dengan pemodelan tertentu dan persamaan-persamaan yang dikembangkan harus dapat mencari set dari variabel *joint*, misalnya besar sudut, yang diumpankan pada robot lengan untuk bergerak dengan acuan terhadap frame dasar [3]. Pada implementasinya, kendali ini digunakan untuk mengontrol keseluruhan robot lengan yang digunakan untuk menggerakkan lampu *dental light* sesuai keinginan dari *user*. Untuk menunjang fleksibilitas dan memaksimalkan daya kerja dari robot lengan perlu dianalisis terlebih dahulu pendesainan terutama dari sisi jumlah derajat kebebasan. Hal ini akan berhubungan secara langsung dengan area kerja yang dapat dicapai. Semakin banyak jumlah derajat kebebasan atau DOF, maka robot lengan akan semakin efisien dan cekatan [4].

Integrasi penggunaan teknologi *image processing* dan teknologi kendali perangkat keras robot lengan digunakan dalam penelitian ini. Penggunaan kamera sebagai sensor akan meningkatkan kemampuan robot untuk menentukan posisi sebuah objek [5]. Pada penelitian lain, pengendalian robot *dual arm* menggunakan kamera dapat menghasilkan posisi sumbu x

dan sumbu y yang digunakan sebagai *input* kendali [6]. Data yang diperoleh berupa titik tengah sumbu x dan sumbu y dari deteksi warna menggunakan *library* OpenCV dimanfaatkan robot lengan untuk bergerak mengikuti gerakan posisi dari objek. Penelitian-penelitian di atas digunakan sebagai tolak ukur bahwa integrasi antar kedua teknologi dapat diterapkan dan diimplementasikan pada kendali gerak dari robot lengan *dental light*.

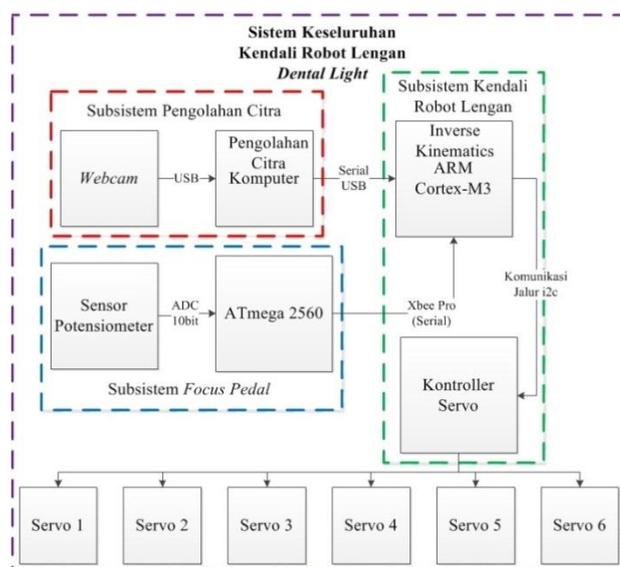
2. METODE PENELITIAN

2.1. Analisis Sistem

Sistem yang dibuat merupakan sistem kendali gerak pada robot lengan *dental light* menggunakan pendekatan solusi algoritma kinematika balik. Algoritma kinematika balik yang diterapkan menggunakan metode analisis aljabar dengan inputan nilai-nilai sumbu kartesian. Proses variasi nilai sumbu memanfaatkan isyarat arah jari tangan yang dikuantisasi menjadi kode-kode tertentu. *Goal* dari sistem adalah dapat menempatkan *end-effector* robot lengan berupa lampu *dental light* pada posisi dan orientasi yang diinginkan berdasarkan *input user* berupa isyarat arah jari tangan.

2.2. Perancangan Sistem

Gambar 1 menunjukkan blok diagram sistem keseluruhan. Sistem terbagi menjadi tiga subsistem besar. Subsistem pertama merupakan sistem kendali robot lengan menggunakan kinematika balik, subsistem kedua yaitu subsistem *focus pedal* sebagai pengatur fokus cahaya dari *dental light*, dan subsistem terakhir yang berfungsi sebagai masukan berupa pengenalan isyarat jari tangan menggunakan pendekatan pengolahan citra. Subsistem kedua dan subsistem ketiga berfungsi sebagai *input* untuk subsistem kendali robot lengan. Subsistem pengolahan citra memanfaatkan unit *notebook* sebagai unit prosesnya dan *web camera* sebagai sensornya. Sedangkan subsistem ketiga menggunakan sensor potensiometer yang dirancang sedemikian rupa sehingga dapat dimanfaatkan untuk menangkap gerakan kanan-kiri, atas-bawah dari kaki *user* pada mekanik pedal. Subsistem ketiga ini menggunakan ATmega 2560 sebagai kendalinya dan memanfaatkan fitur ADC untuk pembacaan sensor potensiometer. Proses kalkulasi persamaan-persamaan *inverse kinematics* dilakukan memanfaatkan mikrokontroler ARM LPC1768 yang memiliki detak mencapai 96 MHz. Persamaan-persamaan yang diproses didominasi fungsi-fungsi trigonometri dan variabel dengan tipe data *float*. Hasil kalkulasi persamaan *inverse kinematics* yang dilakukan diterapkan pada empat DOF utama dari robot lengan, sedangkan dua DOF dari *end-effector* digerakkan menggunakan subsistem *focus pedal*.



Gambar 1 Blok diagram sistem keseluruhan

Integrasi antar ketiga subsistem membutuhkan penyeragaman perintah-perintah kerja yang disepakati antar ketiga subsistem dan dikirim sebagai paket data yang telah distandarkan. Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan perintah-perintah kerja yang digunakan antar ketiga subsistem dalam penelitian ini.

Tabel 1 Tabel instruksi yang digunakan antara subsistem kendali *manipulator dental light* dan subsistem pengenalan isyarat jari tangan

No.	Kode Instruksi (Subsistem Pengenal Isyarat Tangan)	Arti Kode (Subsistem Pengenal Isyarat Tangan)	Kode Instruksi (Subsistem Kendali <i>Dental Light</i>)	Arti Kode (Subsistem Kendali <i>Dental Light</i>)
1.	"1"	Isyarat arah jari ke atas	"1"	<i>Increment</i> pada nilai sumbu Y
2.	"2"	Isyarat arah jari ke bawah	"2"	<i>Decrement</i> pada nilai sumbu Y
3.	"3"	Isyarat arah jari ke kiri	"3"	<i>Increment</i> pada nilai sumbu X
4.	"4"	Isyarat arah jari ke kanan	"4"	<i>Decrement</i> pada nilai sumbu X

Tabel 2 Tabel instruksi yang digunakan antara subsistem kendali *manipulator dental light* dan subsistem *focus pedal*

No.	Kode Instruksi (Subsistem <i>Focus Pedal</i>)	Arti Kode (Subsistem <i>Focus Pedal</i>)	Kode Instruksi (Subsistem Kendali <i>Dental Light</i>)	Arti Kode (Subsistem Kendali <i>Dental Light</i>)
1.	"6"	Isyarat arah pedal ke arah kiri	"54"	<i>Decrement</i> nilai sudut sendi <i>roll</i> dari <i>end-effector</i>
2.	"7"	Isyarat arah pedal ke arah kanan	"55"	<i>Increment</i> nilai sudut sendi <i>roll</i> dari <i>end-effector</i>
3.	"8"	Isyarat arah pedal ke arah atas	"56"	<i>Increment</i> nilai sudut sendi <i>pitch</i> dari <i>end-effector</i>
4.	"9"	Isyarat arah pedal ke arah bawah	"57"	<i>Decrement</i> nilai sudut sendi <i>pitch</i> dari <i>end-effector</i>

2.2.1. Perancangan Kendali Kinematika Balik (*Inverse Kinematics*) Manipulator

Pemodelan matematis diwujudkan dalam rancangan kendali kinematika dari *manipulator*. Langkah-langkah strategis implementasi dimulai dengan menotasikan *manipulator* ke dalam konvensi Denavit-Hartenberg dalam rangka mendapatkan karakteristik dari robot lengan. Langkah selanjutnya adalah mencari persamaan kinematika maju (*direct kinematics*) untuk kemudian diturunkan menjadi persamaan kinematika baliknya (*inverse kinematics*). Pemodelan yang dilakukan menggunakan pendekatan solusi analitis atau analisis aljabar.

Tabel 3 menunjukkan nilai dari empat parameter DH robot lengan *dental light*. Empat parameter ini, masing-masing dua untuk parameter *joint* dan *link* terdiri dari parameter panjang *link*, *link twist*, jarak *joint*, dan sudut *joint*.

Tabel 3 Tabel nilai empat parameter DH robot lengan *dental light*

Link i	a_i	α_i	d_i	θ_i	$C\theta_i$	$S\theta_i$	Ca_i	Sa_i
1	0	-90°	0	θ_1	C_1	S_1	0	-1
2	$a_2 = L_1$	0	0	θ_2	C_2	S_2	1	0
3	$a_3 = L_2$	0	0	θ_3	C_3	S_3	1	0
4	$a_4 = L_3$	0	0	θ_4	C_4	S_4	1	0

Analisis pemodelan kinematika maju menggunakan matriks transformasi homogen yang ditunjukkan pada persamaan (1).

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Matriks transformasi homogen diatas kemudian digunakan untuk mencari matriks transformasi masing-masing sendi pada robot lengan *dental light*, yaitu matriks transformasi 0T_1 , 1T_2 , 2T_3 , dan 3T_4 dengan cara memasukkan nilai dari empat parameter DH yang ditunjukkan pada Tabel 3 ke dalam persamaan (1) sehingga didapat persamaan (2) sampai dengan persamaan (5).

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & -S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & C\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & L_1 \cdot C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & L_1 \cdot S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & L_2 \cdot C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & L_2 \cdot S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & L_3 \cdot C\theta_4 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & L_3 \cdot S\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Setelah didapat matriks transformasi tiap sendi kemudian dicari matriks transformasi dari keseluruhan robot lengan lewat aturan perkalian matriks yang ditunjukkan pada persamaan (6) sampai dengan persamaan (19).

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (6)$$

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & d_x \\ n_y & o_y & a_y & d_y \\ n_z & o_z & a_z & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$n_x = \{ \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} - \{ \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \} \quad (8)$$

$$n_y = \{ \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} - \{ \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \} \quad (9)$$

$$n_z = \{ -\cos\theta_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \} - \{ \sin\theta_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} \quad (10)$$

$$o_x = \{ -\cos\theta_1 \cdot \sin\theta_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} - \{ \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \} \quad (11)$$

$$o_y = \{ -\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} - \{ \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \} \quad (12)$$

$$o_z = \{ \sin\theta_4 (\sin\theta_2 \cdot \cos\theta_3 + \cos\theta_2 \cdot \sin\theta_3) \} - \{ \cos\theta_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} \quad (13)$$

$$a_x = -\sin\theta_1 \quad (14)$$

$$a_y = \cos\theta_1 \quad (15)$$

$$a_z = 0 \quad (16)$$

$$d_x = \{ L_3 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} - \{ L_3 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \} + \{ L_2 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} + L_1 \cdot \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \quad (17)$$

$$d_y = \{ L_3 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} - \{ L_3 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \} + \{ L_2 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} + L_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \quad (18)$$

$$d_z = \{ -L_3 \cdot \cos\theta_4 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \} + \{ L_3 \cdot \sin\theta_4 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \} - \{ L_2 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \} - L_1 \cdot \sin\theta_2 \quad (19)$$

Selanjutnya, dari persamaan (6) sampai dengan persamaan (19) diturunkan guna memperoleh persamaan *inverse kinematics*. Persamaan inilah yang kemudian ditanam pada unit mikrokontroler ARM LPC1768 untuk mengalkulasi nilai dari variabel set *joint* yang perlu diraih tiap sendi untuk memosisikan dan mengorientasikan *end-effector* pada tempatnya. persamaan (20) sampai dengan persamaan (23) menunjukkan persamaan *inverse kinematics* hasil penurunan persamaan *direct kinematics* untuk solusi variabel *joint* pertama θ_1 .

$${}^0T_1^{-1} {}^0T_3 = {}^1T_2 {}^2T_3 \tag{20}$$

$$\begin{bmatrix} C\theta_1 n_x + S\theta_1 n_y & C\theta_1 o_x + S\theta_1 o_y & C\theta_1 a_x + S\theta_1 a_y & C\theta_1 d_x + S\theta_1 d_y \\ -n_z & -o_z & -a_z & -d_z + L_3 \\ -S\theta_1 n_x + C\theta_1 n_y & -S\theta_1 o_x + C\theta_1 o_y & -S\theta_1 a_x + C\theta_1 a_y & -S\theta_1 d_x + C\theta_1 d_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$= \begin{bmatrix} C_{23} & -S_{23} & 0 & L_2 C_{23} + L_1 C_2 \\ S_{23} & C_{23} & 0 & L_2 S_{23} + L_1 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$-S\theta_1 d_x + C\theta_1 d_y = 0 \tag{22}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}(d_y/d_x) \tag{23}$$

Dengan tetap menggunakan persamaan (21) proses pencarian solusi dilanjutkan untuk mencari solusi sudut θ_3 yang ditunjukkan pada persamaan (24) sampai dengan persamaan (29).

$$C\theta_1 d_x + S\theta_1 d_y = L_2 C_{23} + L_1 C_2 \tag{24}$$

$$d_z + L_3 = L_2 S_{23} + L_1 S_2 \tag{25}$$

$$-S\theta_1 d_x + C\theta_1 d_y = 0 \tag{26}$$

$$(C\theta_1 d_x + S\theta_1 d_y)^2 + (-d_z + L_3)^2 + (-S\theta_1 d_x + C\theta_1 d_y)^2 \tag{27}$$

$$= (L_2 C_{23} + L_1 C_2)^2 + (L_2 S_{23} + L_1 S_2)^2 + (0)^2$$

$$C\theta_3 = \frac{d_x^2 + d_y^2 + (d_z + L_3)^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \tag{28}$$

$$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{S_3}{C_3}\right) \tag{29}$$

Melihat persamaan (21) maka sudah tidak ditemukan lagi solusi langsung untuk mencari variabel *joint* tersisa untuk sudut θ_2 dan θ_4 . Maka dilakukan lagi *inverse matrix* yang ditunjukkan pada persamaan (30) dan diringkas menjadi persamaan (31) dan (32)

$${}^0T_1^{-1} {}^1T_2^{-1} {}^0T_3 = {}^2T_3 \tag{30}$$

$$({}^0T_2)^{-1} {}^0T_3 = {}^2T_3 \tag{31}$$

$$\begin{bmatrix} C\theta_1 C\theta_2 & S\theta_1 C\theta_2 & -S\theta_2 & -L_1 \\ -C\theta_1 S\theta_2 & -S\theta_1 S\theta_2 & -C\theta_2 & 0 \\ -S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & d_x \\ n_y & o_y & a_y & d_y \\ n_z & o_z & a_z & d_z + L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{32}$$

$$= \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & L_2 \cdot C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & L_2 \cdot S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Hasil perkalian ruas kiri persamaan (32) kemudian dicarikan solusi langsungnya yang berkorespondensi letak pada ruas kanan.persamaan (33) dan (34) menunjukkan solusi langsung yang dimaksud.

$$C\theta_1 C\theta_2 d_x + S\theta_1 C\theta_2 d_y - S\theta_2 (d_z + L_3) - L_1 = L_2 \cdot C\theta_3 \tag{33}$$

$$-C\theta_1 S\theta_2 d_x - S\theta_1 S\theta_2 d_y - C\theta_2 (d_z + L_3) = L_2 \cdot S\theta_3 \tag{34}$$

Dengan menggunakan metode eliminasi yang diterapkan pada persamaan (33) dan (34) diperoleh persamaan (35) dan solusi untuk sudut θ_2 ditunjukkan pada persamaan (36).

$$S\theta_2 = \frac{-\left((L_2 \cdot C\theta_3 + L_1)(d_z + L_3) + L_2 \cdot S\theta_3(C\theta_1 d_x + S\theta_1 d_y)\right)}{(d_z + L_3)^2 + (C\theta_1 d_x + S\theta_1 d_y)^2} \quad (35)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{S\theta_2}{C\theta_2} \quad (36)$$

Untuk mencari solusi sudut θ_4 digunakan persamaan (37).

$$\theta_4 = 90^\circ - \theta_2 - \theta_3 \quad (37)$$

2.3. Implementasi Perangkat Keras Sistem

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berupa *webcam* Logitech C525 yang tersambung pada *notebook*, subsistem *focus pedal* (sistem minimum ATmega 2560), *breakout board* ARM LPC1768, dan mekanik *manipulator* enam DOF yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Keseluruhan perangkat keras sistem kendali gerak robot lengan *dental light*

2.4. Implementasi Perangkat Lunak Sistem

Implementasi perangkat lunak pada subsistem pengenalan isyarat jari tangan menggunakan pustaka OpenCV yang ditulis menggunakan bahasa C++ dalam lingkup IDE Visual Studio 2010. Implementasi perangkat lunak pada *breakout board* ARM LPC1768 yang digunakan untuk mengalkulasi perhitungan algoritma *inverse kinematics* dilakukan lewat IDE Keil uVision 4 dengan bahasa pemrograman C++. *Output* dari proses kalkulasi berupa nilai sudut tiap sendi diumpangkan pada kontroller servo untuk kemudian dikerjakan tiap-tiap motor servo. Sedangkan implementasi perangkat lunak pada sistem minimum mikrokontroller ATmega 2560 digunakan untuk mengolah nilai dari keluaran sensor potensiometer yang kemudian dicari tau apakah pedal bergerak ke atas, ke bawah, ke kanan, atau ke kiri. Program pada sistem minimum ini ditulis menggunakan bahasa C++ pada lingkungan IDE Arduino.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Penelitian

Gambar 3 merupakan wujud implementasi sistem kendali gerak robot lengan *dental light* ketika sedang beroperasi, Gambar (3a) merupakan tampilan layar *notebook* dalam proses pengenalan isyarat jari tangan menggunakan pendekatan *image processing*, sedangkan Gambar (3b) merupakan visualisasi potret ketika sistem sedang digunakan untuk bekerja. Pada Gambar (3a) terdapat tiga *windows* yang muncul secara simultan. *Windows* atas sebelah kiri menunjukkan arah mana yang terbaca dalam kuantisasi angka, sebelah kanannya merupakan area yang menampilkan jepret *webcam*, sedangkan bawah kiri merupakan contoh hasil pengolahan. Gambar (3b) sendiri menunjukkan robot lengan ketika beroperasi dengan *user* dokter gigi berada di depan camera dan pasien berada di samping kirinya. Subsistem *focus pedal* sendiri diletakkan di samping kanan dari kaki *user* dokter gigi.



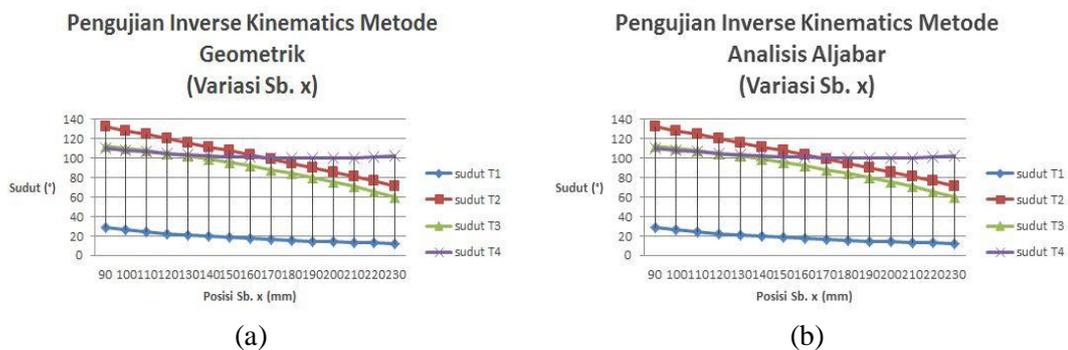
Gambar 3 Wujud implementasi sistem kendali gerak robot lengan *dental light*

Pada sistem dilakukan 4 pengujian, yaitu pengujian kinerja algoritma kinematika balik lewat dua metode, pengujian tingkat akurasi algoritma kinematika balik terhadap algoritma kinematika maju, pengujian tingkat akurasi algoritma kinematika balik secara *hardware* dan pengujian waktu eksekusi program utama. Pengujian kinerja algoritma *inverse kinematics* dilakukan dengan membandingkan hasil kalkulasi metode analisis aljabar dengan hasil kalkulasi metode lain yaitu metode geometri untuk variasi input pada sumbu x dan y. Untuk tiap-tiap variasi pengujian dilakukan sekaligus pada kedua metode, lalu hasil dari pengujian dicatat pada tabel untuk selanjutnya divisualisasikan dalam grafik. Pengujian ini dilakukan dengan mengirimkan hasil perhitungan ke unit *notebook* menggunakan komunikasi serial.

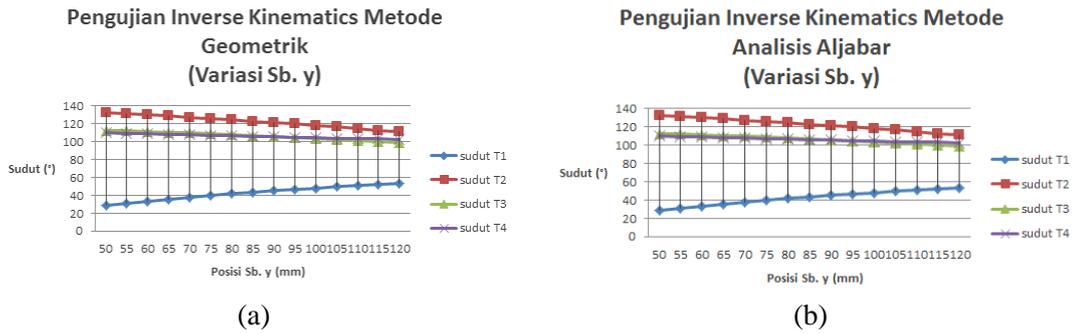
Pengujian tingkat akurasi algoritma *inverse kinematics* terhadap algoritma *direct kinematics* dilakukan dengan cara memvariasi secara berurutan nilai masukan pada sumbu x dan y pada algoritma kinematika balik. Kemudian nilai sudut hasil algoritma kinematika balik diumpangkan kembali pada persamaan-persamaan algoritma kinematika maju. Hal ini dilakukan untuk melihat apakah penurunan yang dilakukan untuk memperoleh persamaan-persamaan kinematika balik sudah benar atau belum. Proses pengujian ini juga dilakukan dengan cara mengirim hasil kalkulasi pada unit *notebook* melalui komunikasi serial.

Pengujian tingkat keakuratan algoritma *inverse kinematics* secara *hardware* digunakan untuk mengetahui seberapa akurat sistem yang dikembangkan dengan cara mengetes secara langsung pada *hardware* sistem pada keadaan beroperasi penuh. Pengujian dilakukan dengan mengukur secara langsung posisi ujung *end-effector* terhadap titik originnya dibantu dengan kertas milimeter block.

Pengujian waktu eksekusi program dilakukan dengan cara menghitung berapa lama waktu yang dihabiskan untuk program utama mengalami satu kali *looping*. Di dalam program utama yang dimaksud tercantum pula fungsi kalkulasi *inverse kinematics*. Hal ini dilakukan dengan memanfaatkan fungsi timer yang ada pada mikrokontroler ARM LPC1768. Dari data waktu eksekusi program ini, kemudian dapat diatur waktu tunda pada subsistem pengenalan isyarat jari tangan agar dalam berkomunikasi dengan subsistem kendali robot lengan dapat sinkron.



Gambar 4 Grafik *data trend* pengujian pada metode geometrik (a) dan metode analisis aljabar (b) dengan variasi pada sumbu x



Gambar 5 Grafik data trend pengujian pada metode geometrik (a) dan metode analisis aljabar (b) dengan variasi pada sumbu y

Tabel 4 Tabel pengujian hasil *inverse kinematics* terhadap *direct kinematics* pada variasi nilai sumbu x

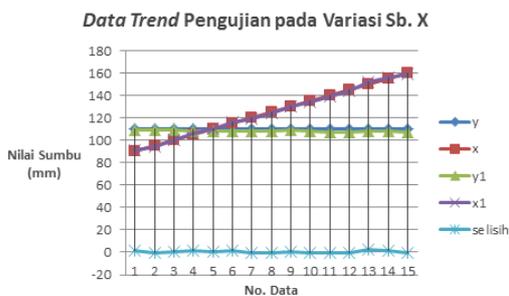
No.	<i>Inverse Kinematics – Algebraic Analytic Method (variasi pada posisi sb. x)</i>			<i>Direct Kinematics – Transformation Matrix (variasi pada posisi sb. x)</i>			Selisih (Sb. X)
	Sb. X (mm)	Sb. Y (mm)	Sb. Z (mm)	Sb. X (mm)	Sb. Y (mm)	Sb. Z (mm)	
1.	90	50	0	89.999939	49.999969	0.000034	0.000061
2.	100	50	0	100.000015	49.999992	0.000029	0.000015
3.	110	50	0	109.999977	50.000008	0.000031	0.000023
4.	120	50	0	120.000000	50.000008	0.000050	0
5.	130	50	0	130.000031	50.000008	0.000027	0.000031
6.	140	50	0	140.000000	49.999992	0.000007	0
7.	150	50	0	150.000015	49.999992	0.000008	0.000015
8.	160	50	0	160.000000	50.000000	0.000021	0
9.	170	50	0	170.000015	49.999996	0.000016	0.000015
10.	180	50	0	180.000046	50.000008	0.000010	0.000046
11.	190	50	0	190.000031	50.000000	0.000025	0.000031
12.	200	50	0	200.000000	50.000000	0.000002	0
13.	210	50	0	210.000015	50.000000	0.000028	0.000015
14.	220	50	0	220.000031	50.000008	0.000010	0.000031
15.	230	50	0	230.000015	50.000004	0.000016	0.000015

Tabel 5 Tabel pengujian hasil *inverse kinematics* terhadap *direct kinematics* pada variasi nilai sumbu x

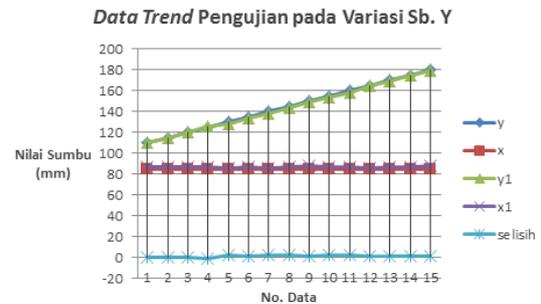
No	<i>Inverse Kinematics – Algebraic Analytic Method (variasi pada posisi sb. y)</i>			<i>Direct Kinematics – Transformation Matrix (variasi pada posisi sb. y)</i>			Selisih (Sb.Y)
	Sb.X (mm)	Sb.Y (mm)	Sb.Z (mm)	Sb.X (mm)	Sb.Y (mm)	Sb.Z (mm)	
1.	90	50	0	89.999939	49.999969	0.000034	0.000031
2.	90	55	0	89.999962	54.999992	0.000011	0.000008
3.	90	60	0	90.000008	60.000008	0.000023	0.000008
4.	90	65	0	90.000000	65.000000	0.000023	0
5.	90	70	0	90.000023	70.000000	0.000015	0
6.	90	75	0	90.000015	75.000008	0.000015	0.000008
7.	90	80	0	90.000008	79.999992	0.000003	0.000008
8.	90	85	0	89.999969	84.999985	0.000014	0.000015
9.	90	90	0	89.999969	89.999985	0.000043	0.000015
10.	90	95	0	89.999985	95.000015	0.000018	0.000015
11.	90	100	0	90.000000	100.000000	0.000017	0
12.	90	105	0	90.000000	105.000023	0.000015	0.000023
13.	90	110	0	89.999985	109.999985	0.000010	0.000015
14.	90	115	0	90.000008	115.000000	0.000042	0
15.	90	120	0	89.999992	119.999977	0.000001	0.000023

Tabel 6 Tabel pengujian waktu eksekusi algoritma kinematika balik metode analisis aljabar pada variasi nilai sumbu x

Data ke-n	Nilai Posisi Sb. X (mm)	Nilai Posisi Sb. Y (mm)	Nilai Posisi Sb. Z (mm)	Lama Waktu untuk Eksekusi (ms)
1.	101	20	0	208
2.	102	20	0	208
3.	103	20	0	208
4.	104	20	0	208
5.	105	20	0	208
6.	106	20	0	208
7.	107	20	0	208
8.	108	20	0	208
9.	109	20	0	208
10.	110	20	0	208
11.	111	20	0	208
12.	112	20	0	208
13.	113	20	0	208
14.	114	20	0	207
15.	115	20	0	207



(a)



(b)

Gambar 6 Grafik data trend pengujian pada algoritma inverse kinematics secara hardware pada variasi nilai sumbu x (a) dan sumbu y (b)

Tabel 7 Tabel pengujian waktu eksekusi algoritma kinematika balik pada variasi nilai sumbu y

Data ke-n	Nilai Posisi Sb. X (mm)	Nilai Posisi Sb. Y (mm)	Nilai Posisi Sb. Z (mm)	Lama Waktu untuk Eksekusi (ms)
1.	100	21	0	207
2.	100	22	0	207
3.	100	23	0	207
4.	100	24	0	207
5.	100	25	0	207
6.	100	26	0	207
7.	100	27	0	207
8.	100	28	0	207
9.	100	29	0	207
10.	100	30	0	207
11.	100	31	0	207
12.	100	32	0	207
13.	100	33	0	207
14.	100	34	0	207
15.	100	35	0	207

3.2. Pembahasan

Gambar 4 (a) dan 4 (b) menunjukkan *data trend* pengujian algoritma *inverse kinematics* untuk dua metode yang digunakan (analisis aljabar dan geometri) pada variasi nilai sumbu x. Sedangkan Gambar 5 (a) dan 5 (b) merupakan *data trend* untuk variasi nilai sumbu y. Dapat kita lihat pada perbandingan masing-masing *trend* bahwa kedua metode memiliki *output joint displacement* yang sangat mendekati nilainya satu sama lain. Hal ini membuktikan bahwa dengan metode apapun memang seharusnya kedua metode memiliki kinerja untuk menghasilkan *output* yang sama. *Trending* ini sekaligus memantapkan bahwa nilai sudut *joint displacement* yang diperoleh akurat secara perhitungan.

Tabel 4 dan Tabel 5 merupakan data pengujian untuk mengecek keakuratan hasil algoritma *inverse kinematics* terhadap algoritma *direct kinematics*. Pengujian dilakukan dengan cara memasukkan kembali nilai dari sudut-sudut hasil perhitungan algoritma kinematika balik ke dalam persamaan algoritma kinematika maju. Tabel 4 merupakan pengujian untuk variasi nilai sumbu x sedang Tabel 5 merupakan pengujian untuk variasi nilai sumbu y. Seperti dapat kita lihat pada Tabel 4 bahwa selisih nilai sumbu x yang muncul setelah nilai sudut-sudut *joint displacement* dimasukkan kembali ke dalam persamaan algoritma kinematika maju sangat kecil. Selisih yang muncul berkisar pada pangkat 10^{-3} . Begitu pula apabila dicermati Tabel 5 yang menunjukkan data pada variasi nilai sumbu y. Selisih yang muncul sangat kecil, bahkan ada beberapa pengujian dimana selisihnya mencapai 0. Hal ini membuktikan bahwa penurunan persamaan diferensial yang telah dilakukan untuk algoritma kinematika maju terhadap algoritma kinematika maju adalah benar dan sesuai dengan kaidah yang diberikan.

Selain melakukan pengujian secara perhitungan, dilakukan pula perhitungan secara *hardware* yang ditunjukkan pada Gambar 6 (a) untuk pengujian pada variasi nilai sumbu x dan Gambar 6 (b) untuk pengujian pada variasi nilai sumbu y. Pada kedua *data trend* gambar tersebut nilai selisih antara nilai sumbu input dengan nilai sumbu uji faktual ditunjukkan lewat garis berwarna biru. Garis biru tersebut terlihat cukup linier berada di sekitar nilai 0 baik untuk Gambar 6 (a) maupun Gambar 6 (b). Selisih faktual nilai sumbu yang diuji berada pada *range* -1 sampai dengan +2. Nilai rata-rata error pada pengujian variasi sumbu x pada nilai 0.09% sedangkan pada sumbu y sebesar 0.11%.

Data pada Tabel 7 dan Tabel 8 menunjukkan hasil pengujian untuk waktu yang diperlukan untuk satu kali *looping* program utama dimana didalamnya dieksekusi pula fungsi perhitungan *inverse kinematics*. Tabel 7 untuk pengujian dengan variasi pada sumbu x sedangkan Tabel 8 dengan variasi pada sumbu y. Pengujian dilakukan dengan menggunakan fitur timer yang dimiliki oleh mikrokontroler ARM LPC1768. Timer dinyalakan ketika eksekusi program utama dimulai kemudian waktu yang dibutuhkan disimpan dalam suatu variabel ketika eksekusi program utama berakhir. Data waktu tersebut dikirim secara *real-time* ke unit *notebook* lewat komunikasi serial. Dari kedua tabel dapat kita lihat bahwa waktu yang dibutuhkan untuk satu kali *looping* program utama berada pada *range* nilai 207-208 ms dan konstan berada pada *range* tersebut baik untuk pengujian pada variasi nilai sumbu x maupun nilai sumbu y.

4. KESIMPULAN

1. Telah berhasil diteliti dan diimplementasikan analisis solusi kinematika balik pada kendali robot lengan *dental light* berbasis pengolahan citra digital berdasarkan isyarat jari tangan.
2. Nilai solusi *joint displacement* yang diperoleh dari hasil kalkulasi baik menggunakan metode geometri maupun analisis aljabar sangat identik. Selisih diantara keduanya berkisar pada tiga angka di belakang koma.
3. Hasil analisis algoritma kinematika balik dengan metode analisis aljabar terbukti akurat dan sesuai dalam proses penurunan persamaannya.

4. Kinerja sistem pada pengujian tingkat *hardware* menawarkan keakuratan dan kepresisian tinggi yang dibuktikan dengan nilai error sangat kecil baik pada variasi sumbu x maupun sumbu y.
5. Waktu eksekusi yang dibutuhkan untuk satu kali *looping* program utama algoritma kinematika balik berada pada *range* 207-208 ms.

5. SARAN

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terutama pada algoritma pengenalan tangan dengan metode identifikasi objek yang lebih baik, sehingga dapat mendeteksi seluruh area objek dan tidak terlalu berpengaruh terhadap perubahan intensitas cahaya. Selain itu, perlu pula dilakukan analisis lanjutan dari *inverse kinematics* berupa analisis gerakan differensial *manipulator* seperti *trajectory planning* dan *joint velocities* tiap sendi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ho, Loc. 2011. Finger Detection and Gesture Recognition. <http://code.google.com/p/finger-detection-and-gesture-recognition/>, diakses pada 17 September 2012.
- [2] Oliviera. *Skin Detection using HSV Color Space*. Brazil : Computation Institute – Universidade Federal Fluminense.
- [3] Mittal, R.K. 2005. *Robotics and Control*. New Delhi : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- [4] Hamed, B. 2011. A Mimicking Human Arm with 5 DOF Controlled by LabVIEW. *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 3, No. 1.
- [5] Nurbiyanto, J. 2001. *Sistem Kendali Lengan Robot Menggunakan Sensor Kamera*. Yogyakarta : Universitas Gadjah Mada.
- [6] Tanjung, 2010. *Kendali Visual Dual Arm Robot Menggunakan Pendekatan Centre of Gravity*. Surabaya : Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.