



ANALYSIS OF INVERSE ANGLE METHOD FOR CONTROLLING TWO DEGREE OF FREEDOM MANIPULATOR

ANALISIS METODE SUDUT BALIK UNTUK PENGENDALIAN MEKANISME PENGGERAK DUA DERAJAT KEBEBASAN

Hendri Maja Saputra^{a,*}, Zainal Abidin^b, Estiko Rijanto^a

^a Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik - LIPI
Kompleks LIPI Jl Sangkuriang, Gd 20, Lt 2, Bandung, Jawa Barat 40135, Indonesia

^b Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara - ITB
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia

Received 23 May 2012; received in revised form 7 June 2012; accepted 7 June 2012

Published online 31 July 2012

Abstract

Driver mechanism with two degree of freedom (MP 2-DK) is a robotic device that can be used for various applications such as turret drive system, gufling gun, launcher, radar antennas, and communications satellite antennas. The precision and the speed of a MP 2-DK are determined by its control system. The calculation inverse angle due to interference in six degree of freedom is necessary to control a MP 2 DK. This paper analyses three calculation methods of inverse angle which are iteration method using Jacobian matrix, reduction of matrix equations using positioning geometry, and an analytical derivation using a rotation matrix. The simulation results of the three methods showed that the first and the third methods could visually demonstrate three rotational disturbances, whereas the second method could only demonstrate the pitch and yaw (PY) disturbances. The third method required less processing time than the first and the second methods. The best method based on this research was the method of rotation matrix.

Key words: driver mechanism, control, inverse angle, Jacobian, geometry

Abstrak

Mekanisme penggerak dua derajat kebebasan (MP 2-DK) merupakan peralatan robotik yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi seperti sistem penggerak turret, peluncur roket/rudal, antena radar, dan antena komunikasi satelit. Tingkat presisi dan kecepatan gerak MP 2-DK sangat ditentukan oleh sistem kendalinya. Untuk pengendalian MP 2-DK perlu dihitung sudut balik akibat gangguan enam derajat kebebasan (rotasi: roll, pitch, yaw, translasi: b_x , b_y , b_z). Makalah ini membahas hasil analisis 3 metode perhitungan sudut balik, antara lain metode iterasi menggunakan matriks Jacobian, penurunan persamaan geometri menggunakan matriks posisi, dan penurunan secara analitis menggunakan matriks rotasi. Hasil simulasi dari ketiga metode membuktikan bahwa metode pertama dan ketiga secara visual dapat mempresentasikan ketiga gangguan rotasi yang terjadi, sedangkan metode kedua hanya mempresentasikan gangguan pitch dan yaw (PY) saja. Metode ketiga memerlukan waktu proses lebih cepat daripada metode pertama dan metode kedua. Metode yang terbaik berdasarkan penelitian ini adalah metode ketiga (metode matriks rotasi).

Kata kunci: mekanisme penggerak, pengendalian, sudut balik, Jacobian, geometri.

I. PENDAHULUAN

Kepresisian merupakan hal penting yang ingin dicapai dalam bidang robot dan mekatronik. Kepresisian dalam bidang mekatronik sangat tergantung pada masalah kinematika, dinamika dan teknik kontrol. Mekanisme penggerak dua derajat kebebasan (MP 2-DK) adalah sebuah

contoh peralatan mekatronik yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi seperti sistem penggerak *turret*, peluncur roket/rudal, antena radar, dan antena komunikasi satelit.

Penelitian terkait kinematika, dinamika, dan sistem kontrol terus-menerus dilakukan untuk memperoleh MP 2-DK yang mampu mempertahankan arah sasaran akibat gangguan rotasi (*roll*, *pitch*, *yaw*/RPY) dan translasi (b_x , b_y , b_z). Rotasi koordinat lokal terhadap koordinat

* Corresponding Author. Tel: +62-22-2503055
E-mail: hendri_maja@yahoo.co.id

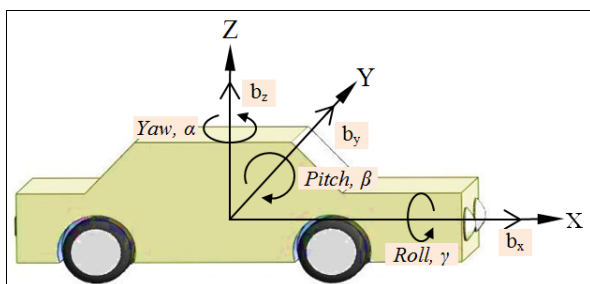
global dapat diturunkan melalui interpretasi sudut tetap XYZ (*fixed XYZ*), sudut Euler ZYX, dan sudut Euler ZYZ [1]. Metode kinematika balik berguna untuk menentukan sudut manipulator lengan robot untuk mencapai posisi tertentu sebagaimana telah dijelaskan di beberapa referensi [1, 2].

Penelitian mengenai kinematika balik dengan metode geometri dan Jacobian untuk kepala robot *Rochester* dapat dilihat pada [3]. Kinematika balik melalui proses komputasi dengan algoritma Jacobian *pseudoinverse* dapat dilihat pada [4, 5]. Algoritma kinematika balik Jacobian untuk manipulator statis dan robot mobil dapat dilihat pada [6]. Pada [7] dibahas algoritma numerik untuk menyelesaikan permasalahan kinematika balik dengan pendekatan teknik *extended Jacobian* yang dibandingkan dengan metode *inverse Jacobian*.

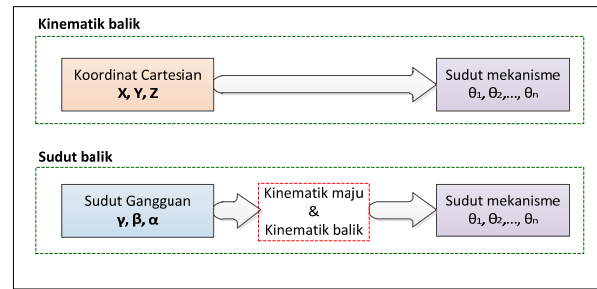
Kinematika balik manipulator secara umum dapat diselesaikan dengan cara yang sederhana ataupun dengan metode lain yang lebih canggih seperti Neural Network [8-10], dengan perangkat lunak ANFIS [11-13], pendekatan Generik-Neuron [14], Neuro Fuzzy [15], dan algoritma genetik [16].

Istilah kinematika balik biasa digunakan untuk penentuan sudut agar mencapai posisi Cartesian tertentu. Penelitian ini difokuskan pada penentuan sudut (θ_1 dan θ_2) yang harus dibentuk akibat rotasi sudut RPY (γ, β, α), sehingga di sini digunakan istilah ‘sudut balik’ yang dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2.

Tujuan makalah ini adalah merekomendasikan metode yang optimal untuk digunakan sebagai kompensasi gangguan rotasi akibat pergerakan platform dengan asumsi kendaraan berada pada posisi tertentu (tidak ada pergerakan translasi). Metode yang dibandingkan adalah iterasi menggunakan matriks Jacobian, penurunan persamaan geometri menggunakan matriks posisi, dan penurunan secara analisis menggunakan matriks rotasi. Penelitian lain yang membandingkan/membuktikan hasil dari ketiga metode ini belum pernah dilakukan, baik simulasi maupun eksperimen.



Gambar 1. Ilustrasi gangguan rotasi *roll* (γ), *pitch* (β), dan *yaw* (α) dan translasi (b_x, b_y, b_z) [4].



Gambar 2. Perbedaan kinematika balik dengan sudut balik.

II. PEMODELAN KINEMATIKA

Pemodelan kinematika mekanisme penggerak dua derajat kebebasan (MP 2-DK) dibagi menjadi dua bagian. Bagian yang pertama adalah model gangguan platform enam derajat kebebasan yaitu rotasi (*roll, pitch, yaw*) dan translasi (b_x, b_y, b_z), sedangkan bagian kedua adalah model kinematika mekanisme MP 2-DK. Gambar 3 menunjukkan komunikasi satelit sebagai objek penelitian MP 2-DK.

A. Model Gangguan Platform

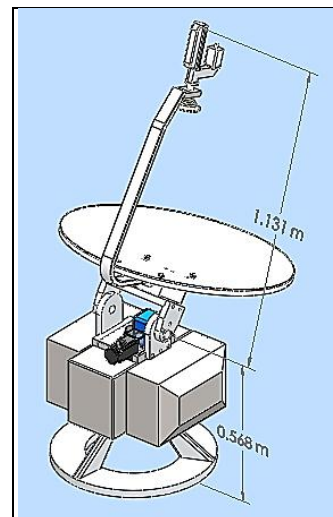
Platform kendaraan darat, laut, dan udara dengan mekanisme MP 2-DK yang mengalami gangguan rotasi dan translasi yang dimodelkan dengan menggunakan sudut Euler ZYX dijelaskan dengan persamaan (1) berikut:

Rotasi, $R_{\alpha,\beta,\gamma} = \text{yaw}(\alpha) * \text{pitch}(\beta) * \text{roll}(\gamma)$

$$R_{\alpha,\beta,\gamma} = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dimana $s\alpha = \sin(\alpha)$, $c\alpha = \cos(\alpha)$, $s\beta = \sin(\beta)$, $c\beta = \cos(\beta)$, $s\gamma = \sin(\gamma)$, dan $c\gamma = \cos(\gamma)$, sedangkan gangguan translasinya mengikuti persamaan (2):

$$\text{Translasi}, b = [b_x \ b_y \ b_z]^T \quad (2)$$



Gambar 3. MP 2-DK komunikasi satelit.

Kedua jenis gangguan (rotasi dan translasi) ini dapat disatukan ke dalam matriks transformasi homogen gangguan platform (4x4) seperti persamaan (3).

$$T_k = \begin{bmatrix} R_{\alpha,\beta,\gamma} & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

B. Model Kinematika Mekanisme

Model kinematika diturunkan dengan notasi Denavit-Hartenberg (notasi D-H) yang biasa digunakan dalam bidang robotika. Koordinat yang menunjukkan simbol berbagai parameter dari mekanisme dua derajat kebebasan yang hampir serupa dapat dilihat pada [4]. Untuk mekanisme MP 2-DK, matriks transformasi homogenya adalah seperti persamaan (4a).

$$T_{mt} = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 & -c\theta_1 s\theta_2 & s\theta_1 & b_x \\ s\theta_1 c\theta_2 & -s\theta_1 s\theta_2 & -c\theta_1 & b_y \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & b_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4a)$$

Dimana:

$$b_x = L_{tt}c\theta_1c\theta_2 - L_y c\theta_1s\theta_2 + L_zs\theta_1$$

$$b_y = L_{tt}s\theta_1c\theta_2 - L_y s\theta_1s\theta_2 - L_zc\theta_1$$

$$b_z = L_1 + L_{tt}s\theta_2 + L_y c\theta_2$$

Notasi L_{tt} merupakan panjang total lengan 2 (L_2) ditambah dengan jarak ujung lengan 2 ke objek yang menjadi target (L_x) atau secara matematis ditulis $L_{tt} = L_2 + L_x$. Matriks Jacobian yang telah diturunkan dari matriks di atas adalah

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; J_2 = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \\ J_{31} & J_{32} \end{bmatrix} \quad (4b)$$

Dimana:

$$J_{11} = -L_{tt}s\theta_1c\theta_2 + L_y s\theta_1s\theta_2 + L_zc\theta_1$$

$$J_{21} = L_{tt}c\theta_1c\theta_2 - L_y c\theta_1s\theta_2 + L_zs\theta_1$$

$$J_{31} = 0$$

$$J_{12} = -L_{tt}c\theta_1s\theta_2 - L_y c\theta_1c\theta_2$$

$$J_{22} = -L_{tt}s\theta_1s\theta_2 - L_y s\theta_1c\theta_2$$

$$J_{32} = -L_{tt}s\theta_1s\theta_2 - L_y s\theta_1c\theta_2$$

$$J_{32} = L_{tt}c\theta_2 - L_y s\theta_2$$

C. Transformasi homogen total

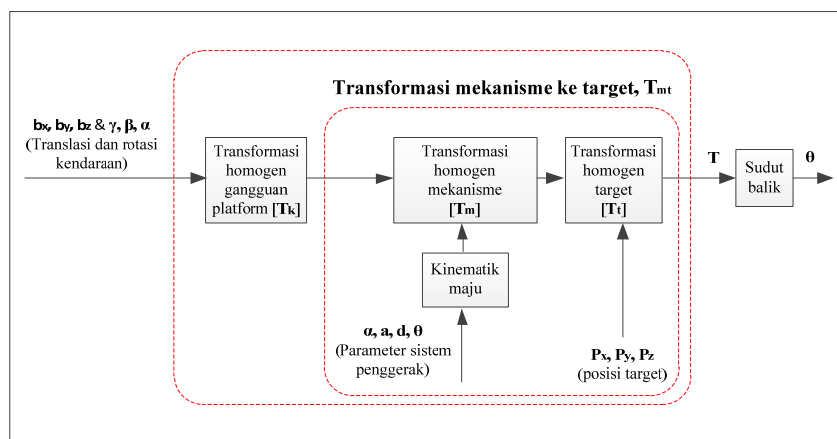
Diagram blok penurunan persamaan transformasi homogen total untuk MP 2-DK dapat dilihat pada Gambar 4. Matriks transformasi homogen total diperoleh dengan mengalikan matriks homogen gangguan platform dengan matriks homogen mekanisme ke target, sehingga persamaannya berbentuk seperti persamaan (5):

$$T = T_k * T_{mt} = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & P_x \\ n_y & s_y & a_y & P_y \\ n_z & s_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

dimana $n_x, n_y, n_z, s_x, s_y, s_z, a_x, a_y, a_z, P_x, P_y, P_z$ didefinisikan pada persamaan (6 s/d 9) dan persamaan (18 s/d 27).

III. METODA SUDUT BALIK

Penentuan sudut balik dapat diturunkan melalui tiga metode, yaitu: iterasi menggunakan matriks Jacobian, penurunan secara geometri dari matriks translasi, dan analisis dari matriks rotasi. Pada penelitian ini, setiap selesai uraian dari masing-masing metode, akan dibuat simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab yang dilakukan dengan dua tahap. Pada tahap pertama, gangguan rotasi yang diberikan hanya berupa *pitch* dan *yaw* saja (PY, dengan gangguan *roll* = 0). Tahap kedua yakni dengan memberikan gangguan berupa *roll, pitch, dan yaw* (RPY). Parameter yang digunakan untuk simulasi dapat dilihat pada Tabel 1. Gangguan RPY dimasukkan pada simulasi menggunakan interpretasi sudut Euler ZYX dengan waktu cuplik 56 milidetik.



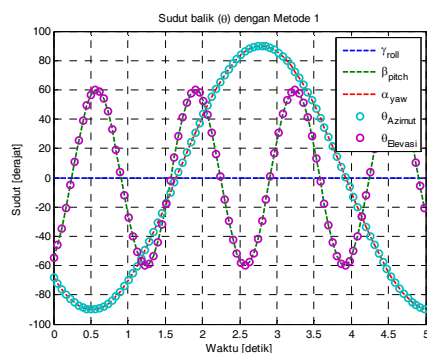
Gambar 4. Transformasi homogen total untuk sudut balik.

Galat dari hasil simulasi untuk tahap pertama dihitung berdasarkan selisih antara hasil metode matriks Jacobian, metode matriks posisi, dan metode matriks rotasi terhadap masukan gangguan yang diberikan (PY), sedangkan galat tahap kedua dihitung berdasarkan selisih antara metode kedua atau metode ketiga terhadap metode pertama.

Simulasi untuk ketiga metode dibuat dalam satu program, dimana ketiga metode memperoleh masukan (gangguan) yang sama, lalu dari nilai masukan tersebut dilakukan perhitungan sudut balik untuk metode matriks Jacobian, metode matriks posisi, dan metode matriks rotasi. Persamaan untuk memperoleh nilai sudut balik yang digunakan berbeda. Persamaan untuk metode matriks Jacobian yakni menggunakan algoritma sebagaimana yang ditunjukkan oleh Tabel 2, yang kemudian dilakukan proses iterasi. Persamaan yang digunakan dalam pemrograman untuk melakukan perhitungan metode matriks posisi adalah persamaan (12) sampai dengan persamaan (17) yang diperoleh melalui perhitungan secara langsung berdasarkan geometri, sedangkan untuk metode matriks rotasi menggunakan persamaan (28) dan persamaan (29) yang diperoleh melalui analisis. Uraian secara lengkap dari ketiga metode yang telah dijelaskan adalah sebagai berikut.

Tabel 1
Parameter simulasi.

Parameter	Nilai (Satuan)
Gangguan translasi platform kendaraan, $[b_x \ b_y \ b_z]$	$[0 \ 0 \ 0]$ (m)
Jarak ujung lengan 2 ke target, L_x	1.000 (m)
Frekuensi gangguan, $[f_r \ f_p \ f_y]$	$[1,25 \ 0,75 \ 0,22]$ (Hz)
Amplitudo gangguan, $[m_r \ m_p \ m_y]$	$[\pi/4 \ \pi/3 \ \pi/2]$ (rad)
Offset gangguan, $[O_r \ O_p \ O_y]$	$[0 \ 2 \ 4]$ (rad)
Panjang lengan MP 2-DK, $[L_1 \ L_2]$	$[0,57 \ 1,13]$ (m)



(a)

A. Metode Matriks Jacobian

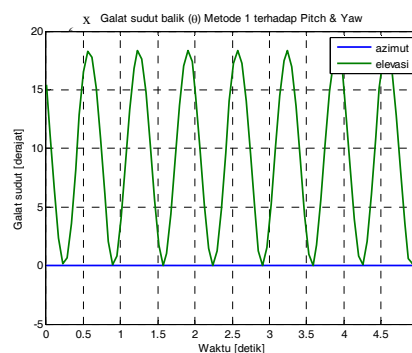
Pada metode ini dilakukan iterasi dengan menggunakan *pseudoinverse* dari matriks Jacobian MP 2-DK. Algoritma yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

Sudut balik yang dihasilkan oleh metode ini terhadap gangguan *pitch* dan *yaw* (PY) dapat dilihat pada Gambar 5a, sedangkan galat sudut balik terhadap gangguan sudut ditunjukkan pada Gambar 5b. Pada Gambar 5 tampak bahwa galat maksimum dari sudut balik elevasi maupun sudut balik azimuth yang dihasilkan memiliki nilai yang sangat kecil.

Gambar 6 menunjukkan sudut balik yang dihasilkan oleh metode matriks Jacobian terhadap gangguan RPY. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa sudut azimuth dan elevasi mengalami interferensi dari gangguan *roll*. Khusus untuk simulasi tahap kedua, metode ini (Gambar 6) akan dijadikan sebagai pembanding bagi metode lainnya.

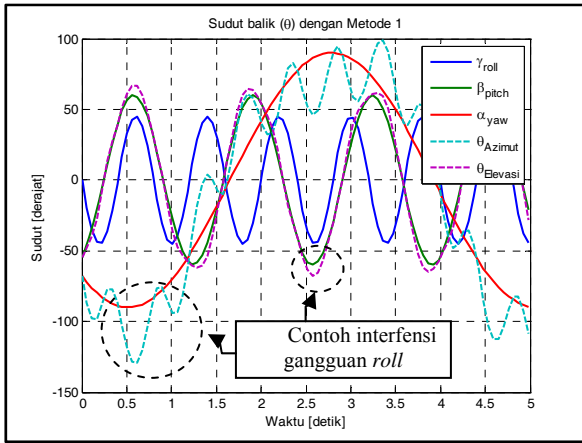
Tabel 2
Algoritma kinematik balik metode Jacobian.

No	Proses
1	Hitung matriks Jacobian menggunakan persamaan (5)
2	Hitung <i>pseudoinverse</i> dari matriks Jacobian $J^* = (J^T J)^{-1} J^T$
3	Hitung perubahan sudut sendi $\Delta\theta = J^* \Delta e$ Dimana Δe diperoleh dari nilai pada persamaan (6) yang dimasukkan ke dalam persamaan
	$\Delta e = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 0,5(s_z - a_y) \\ 0,5(a_x - n_z) \\ 0,5(a_y - s_x) \end{bmatrix}$
4	Implementasikan perubahan sudut $\theta_{\text{sesudah}} = \theta_{\text{sebelum}} + \Delta\theta$
5	Normalisasi perubahan sudut $N_\theta = \text{norm}(\Delta\theta)$
6	Nilai θ yang sesuai ditemukan, apabila N_θ lebih kecil dari nilai toleransi yang diinginkan.



(b)

Gambar 5.(a) Sudut balik metode matriks Jacobian terhadap gangguan PY; (b) galat sudut.



Gambar 6. Sudut balik metode matriks Jacobian terhadap gangguan RPY.

B. Metode Matriks Posisi

Metode ini merupakan penurunan sudut balik menggunakan persamaan geometri dari MP 2-DK dengan memanfaatkan matriks posisi dari transformasi homogen total, $P = [P_x \ P_y \ P_z]^T$ dimana:

$$P_x = (cac\beta)(L_2 + L_x)c\theta_1c\theta_2 + (cas\beta s\gamma - sac\gamma)(L_2 + L_x)s\theta_1c\theta_2 + (cas\beta c\gamma + sas\gamma)(L_1 + (L_2 + L_x)s\theta_2) + px \quad (6)$$

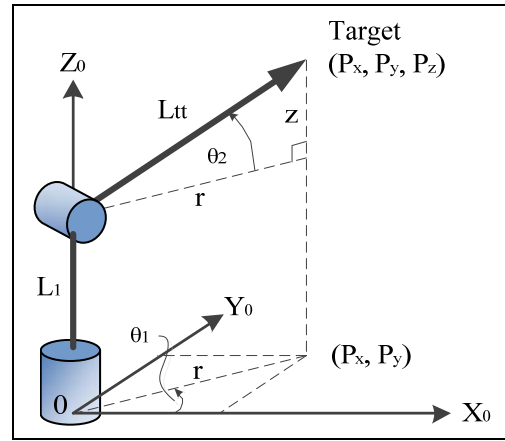
$$P_y = (sac\beta)(L_2 + L_x)c\theta_1c\theta_2 + (sas\beta s\gamma + cac\gamma)(L_2 + L_x)s\theta_1c\theta_2 + (sas\beta c\gamma - cas\gamma)(L_1 + (L_2 + L_x)s\theta_2) + py \quad (7)$$

$$P_z = (-s\beta)(L_2 + L_x)c\theta_1c\theta_2 + (c\beta s\gamma)(L_2 + L_x)s\theta_1c\theta_2 + (c\beta c\gamma)(L_1 + (L_2 + L_x)s\theta_2) + pz \quad (8)$$

Gambar 7 menunjukkan model kinematika mekanisme MP 2-DK untuk penurunan sudut balik dengan metode geometri. Untuk penyelesaian persamaan diatas, diperlukan nilai z dan r , dimana nilai tersebut dapat dihitung dari persamaan (10) dan (11)

$$z = P_z - L_1 \quad (9)$$

$$r = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (10)$$



Gambar 7. Model kinematika mekanisme MP 2-DK.

Terdapat tiga persamaan yang dapat dibentuk untuk menentukan sudut θ_1 dan tiga persamaan untuk menentukan sudut θ_2 , yaitu:

- Sudut azimut
$$\sin \theta_1 = \frac{P_y}{r} \Rightarrow \theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{P_y}{r} \right) \quad (11)$$

- $$\cos \theta_1 = \frac{P_x}{r} \Rightarrow \theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{P_x}{r} \right) \quad (12)$$

- $$\tan \theta_1 = \frac{P_y}{P_x} \Rightarrow \theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) \quad (13)$$

- Sudut elevasi

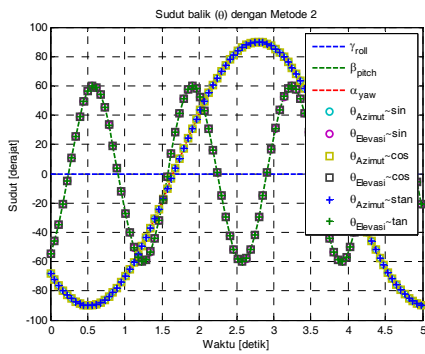
- $$\sin \theta_2 = \frac{z}{L_{tt}} \Rightarrow \theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{z}{L_{tt}} \right) \quad (14)$$

- $$\cos \theta_2 = \frac{r}{L_{tt}} \Rightarrow \theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{r}{L_{tt}} \right) \quad (15)$$

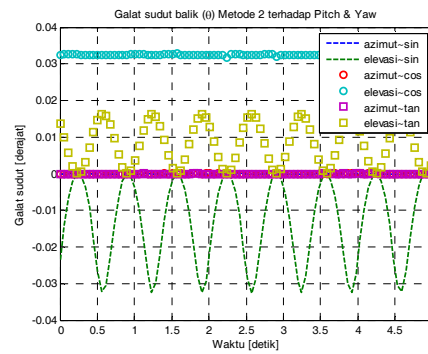
- $$\tan \theta_2 = \frac{z}{r} \Rightarrow \theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{z}{r} \right) \quad (16)$$

Sudut balik yang dihasilkan oleh metode ini terhadap gangguan *pitch* dan *yaw* (PY) dapat dilihat pada Gambar 8a, sedangkan galat sudut balik terhadap gangguan sudut ditunjukkan pada Gambar 8b.

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa galat sudut balik yang dihasilkan berupa sudut elevasi yang memiliki nilai yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan galat sudut azimut. Sudut balik yang dihasilkan oleh metode ini terhadap

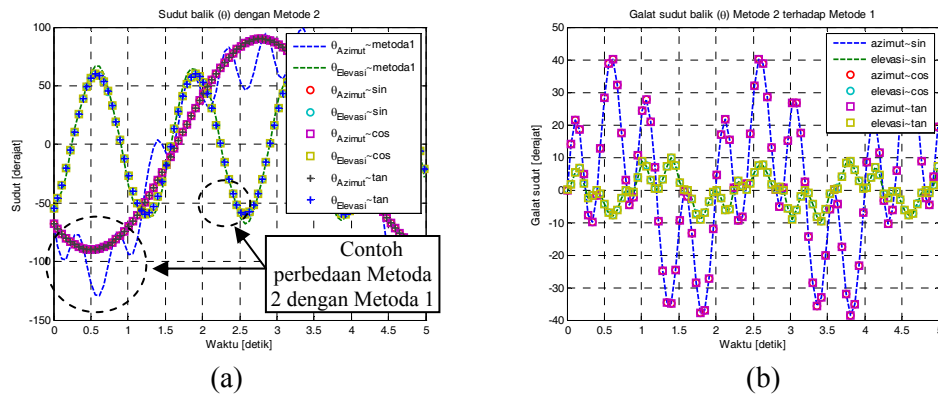


(a)



(b)

Gambar 8. (a) Sudut balik metode matriks posisi terhadap gangguan PY; (b) galat sudut.



Gambar 9. (a) Sudut balik metode matriks posisi terhadap gangguan RPY; (b) galat sudut.

gangguan RPY dapat dilihat pada Gambar 9a, sedangkan galat sudut balik terhadap gangguan sudut ditunjukkan pada Gambar 9b. Pada Gambar 9, galat yang dihasilkan sangat besar, dimana galat sudut azimut maksimum adalah 40,79 derajat dan galat sudut elevasi maksimum adalah 9,79 derajat. Berdasarkan hasil ini, maka dapat disimpulkan bahwa penggunaan metode ini untuk mendapatkan sudut balik dapat menyebabkan ketidakakuratan sudut MP 2-DK.

C. Metode Matriks Rotasi

Metode ini dilaksanakan dengan menurunkan secara analisis matriks rotasi dari matriks homogen total, R yaitu:

$$R = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

dimana:

$$n_x = (cac\beta)c\theta_1c\theta_2 + (cas\beta s\gamma - sac\gamma)s\theta_1c\theta_2 + (cas\beta c\gamma + sas\gamma)s\theta_2 \quad (18)$$

$$n_y = (sac\beta)c\theta_1c\theta_2 + (sas\beta s\gamma + cac\gamma)s\theta_1c\theta_2 + (sas\beta c\gamma - cas\gamma)s\theta_2 \quad (19)$$

$$n_z = (-s\beta)c\theta_1c\theta_2 + (c\beta s\gamma)s\theta_1c\theta_2 + (c\beta c\gamma)s\theta_2 \quad (20)$$

$$s_x = -(cac\beta)c\theta_1s\theta_2 - (cas\beta s\gamma - sac\gamma)s\theta_1s\theta_2 + (cas\beta c\gamma + sas\gamma)c\theta_2 \quad (21)$$

$$s_y = -(sac\beta)c\theta_1s\theta_2 - (sas\beta s\gamma + cac\gamma)s\theta_1s\theta_2 + (sas\beta c\gamma - cas\gamma)c\theta_2 \quad (22)$$

$$s_z = (s\beta)c\theta_1s\theta_2 - (c\beta s\gamma)s\theta_1s\theta_2 + (c\beta c\gamma)c\theta_2 \quad (23)$$

$$a_x = (cac\beta)s\theta_1 - (cas\beta s\gamma - sac\gamma)c\theta_1 \quad (24)$$

$$a_y = (sac\beta)s\theta_1 - (sas\beta s\gamma + cac\gamma)c\theta_1 \quad (25)$$

$$a_z = (-s\beta)s\theta_1 - (c\beta s\gamma)c\theta_1 \quad (26)$$

Setiap baris atau kolom dari matriks rotasi, R dapat dinormalisasi (penjumlahan dari setiap komponen yang dikuadratkan merupakan vektor unit atau sama dengan satu).

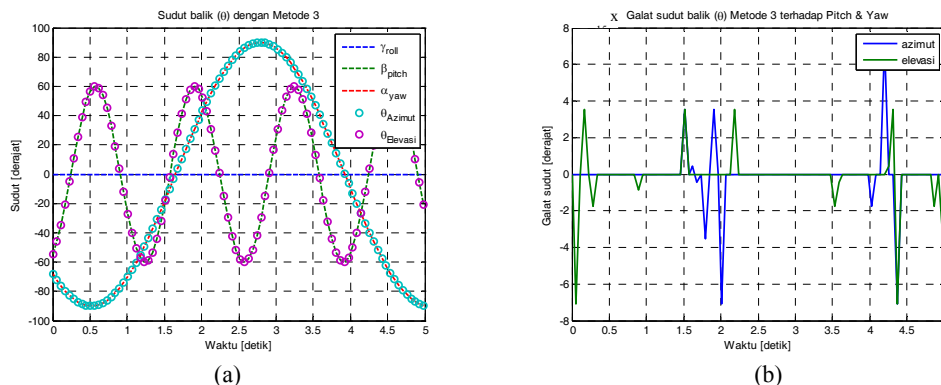
Dengan menurunkan secara analisis kolom ketiga untuk mencari θ_1 dan baris ketiga untuk mencari θ_2 , maka dapat diperoleh

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{(-a_y)} \right) \quad (27)$$

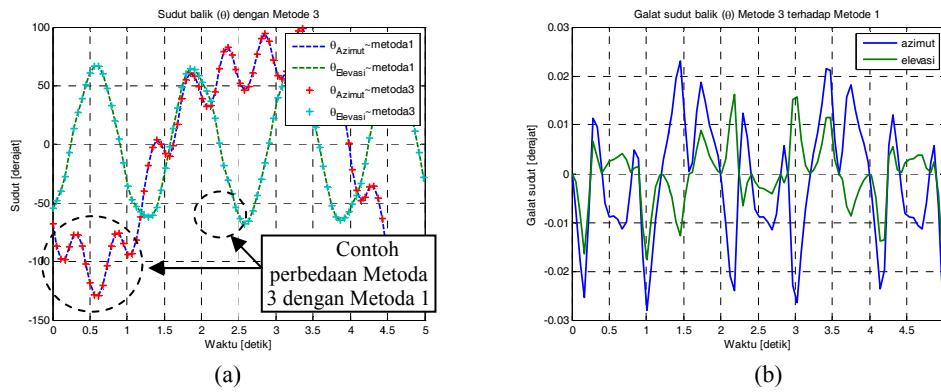
$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{n_z}{s_z} \right) \quad (28)$$

Sudut balik yang dihasilkan oleh metode ini terhadap gangguan *pitch* dan *yaw* (PY) dapat dilihat pada Gambar 10a, sedangkan galat sudut balik terhadap gangguan sudut ditunjukkan pada Gambar 10b.

Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa galat maksimum sudut balik yang dihasilkan sangat kecil yaitu $7,11 \times 10^{-15}$ derajat.



Gambar 10. (a) Sudut balik metode matriks rotasi terhadap gangguan PY; (b) galat sudut.



Gambar 11. (a) Sudut balik metode matriks rotasi terhadap gangguan RPY; (b) galat sudut.

Sudut balik yang dihasilkan oleh metode ini terhadap gangguan RPY dapat dilihat pada Gambar 11a, sedangkan galat sudut balik terhadap gangguan sudut ditunjukkan pada Gambar 11b. Pada Gambar 11a tampak bahwa sudut balik yang dihasilkan hampir sama dengan sudut balik metode matriks Jacobian, sedangkan galat sudut yang terjadi juga relatif kecil.

IV. PEMBAHASAN

Perbandingan galat maksimum dari ketiga metode yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4. Waktu proses perhitungan untuk ketiga metode dalam menghasilkan sudut balik juga merupakan hal yang perlu diperhatikan dalam penelitian. Waktu proses yang direkam

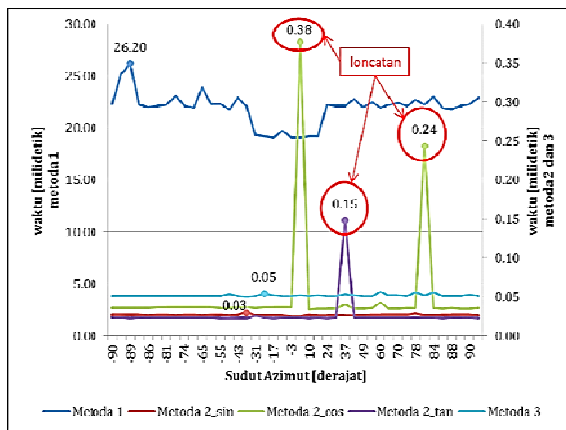
secara *realtime* pada saat prosesor melakukan perhitungan dengan ketiga metode akibat adanya gangguan PY dapat dilihat pada Gambar 12. Gambar 12 memberikan informasi bahwa metode matriks posisi memiliki waktu proses paling cepat (tangen, sinus, kosinus secara berurutan), tetapi terjadi ‘loncatan’ untuk penggunaan kosinus dan tangen. Metode matriks rotasi memiliki waktu proses lebih lambat dari metode matriks posisi, tetapi jauh lebih cepat apabila dibandingkan metode matriks Jacobian dan secara visual lebih stabil. Gambar 13 menunjukkan waktu proses yang direkam secara *realtime* pada saat prosesor melakukan perhitungan dengan ketiga metode akibat adanya gangguan RPY. Gambar 13 menunjukkan karakter yang hampir serupa dengan Gambar 12. Pada gambar ini tampak bahwa metode matriks

Tabel 3 Galat maksimum terhadap gangguan PY.

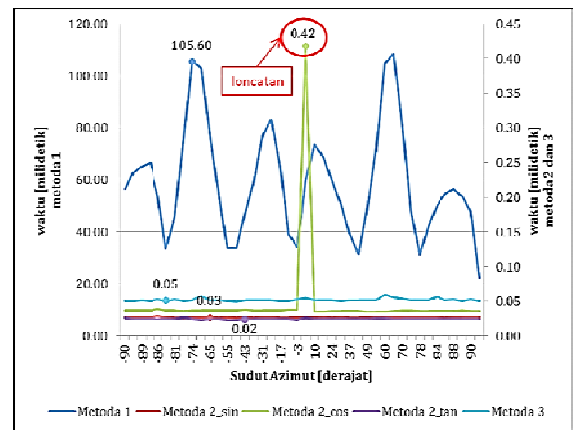
Metode	Sudut balik (derajat)	
	Azimut	Elevasi
Matriks Jacobian	$1,42 \times 10^{-14}$	$1,84 \times 10^{-5}$
Matriks Posisi	sin	$1,59 \times 10^{-11}$
	cos	$3,35 \times 10^{-13}$
	tan	$1,42 \times 10^{-14}$
Matriks Rotasi	analisis	$7,11 \times 10^{-15}$

Tabel 4 Galat maksimum terhadap gangguan RPY.

Metode	Galat maksimum (derajat)	
	Azimut	Elevasi
Matriks posisi	sin	40,79
	cos	40,79
	tan	40,79
Matriks rotasi	analisis	0,03



Gambar 12. Perbandingan waktu proses ketiga metode untuk gangguan PY.



Gambar 13. Perbandingan waktu proses ketiga metode untuk gangguan RPY.

posisi memiliki waktu proses paling cepat (tangen, sinus, dan kosinus secara berurutan), tetapi terjadi 'loncatan' untuk penggunaan kosinus. Metode matriks rotasi memiliki waktu proses lebih lambat dari metode matriks posisi, tetapi jauh lebih cepat apabila dibandingkan metode matriks Jacobian dan secara visual lebih stabil.

V. KESIMPULAN

Metode matriks Jacobian dan Metode matriks rotasi secara visual dapat menggambarkan interfensi gangguan RPY dengan jelas, sedangkan pada metode matriks posisi hanya menggambarkan interfensi gangguan *pitch* dan *yaw* saja. Dari simulasi tahap kedua, galat maksimum metode matriks posisi terhadap metode matriks Jacobian adalah 40,79 derajat (azimut) dan 9,79 derajat (elevasi), sedangkan galat maksimum metode matriks rotasi terhadap metode matriks Jacobian adalah 0,03 derajat (azimut) dan 0,02 derajat (elevasi). Metode yang paling optimal untuk memperoleh sudut balik MP 2-DK berdasarkan hasil simulasi di atas adalah dengan menggunakan metode matriks rotasi, karena dapat menginterpretasikan gangguan RPY dengan waktu proses yang jauh lebih cepat dibandingkan metode matriks Jacobian dan lebih stabil jika dibandingkan metode matriks posisi.

Prosedur penelitian ini diawali dengan melakukan simulasi, sehingga kesimpulan yang diperoleh pada pembahasan ini baru analisa dari hasil simulasi. Ekperimen untuk memperkuat hipotesis atau kesimpulan akan dilakukan pada tahapan selanjutnya.

REFERENSI

- [1] J.J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3rd ed. Canada, USA: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [2] F.L. Lewis, D.M. Dawson, and C.T. Abdallah, *Robot Manipulator Control Theory and Practice*, 2nd ed. New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [3] J. Soong and C. Brown, "Inverse Kinematics and Gaze Stabilization for the Rochester Robot Head," Computer Science Department, the Univ. of Rochester, NY 14627, Technical Report 394 Agustus 1991.
- [4] H.M. Saputra, E. Rijanto, "Analisis Kinematik dan Dinamik Mekanisme Penggerak 2-DOF untuk Antena Bergerak pada Komunikasi Satelit," *Teknologi Indonesia*, vol. 32, No.1, pp. 21-29, 2009.
- [5] A. Aristidou, J. Lasenby, "Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver," University of Cambridge, Technical Report CUED/F-INFENG/TR-632, 2009.
- [6] K. Tchou, J. Karpinska, and M. Janiak, "Approximation of Jacobian Inverse Kinematics Algorithms," *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 19, pp. 519-531, 2009.
- [7] M. Šoch and R. Lórencz, "Solving Inverse Kinematics – A New Approach to the Extended Jacobian Technique," *Acta Polytechnica*, vol. 45, No. 2, pp. 21-26, 2005.
- [8] Y. Feng, W. Yao-nan, and Y. Yi-min, "Inverse Kinematics Solution for Robot Manipulator based on Neural Network under Joint Subspace," *International Journal of Computers and Communications*, vol. 7, No.3, pp. 459-472, September 2012.
- [9] A. Olaru, S. Olaru, D. Paune, "Assisted Research and Optimization of the proper Neural Network Solving the Inverse Kinematics Problem," in *Proc. of 2011 Int. Con. on Optimization of the Robots and Manipulators*, Romania, 26-28 Mei 2011.
- [10] Z. Bingul, H.M. Ertunc, and C. Oysu, "Comparison of Inverse Kinematics Solutions Using Neural Network for 6R Robot Manipulator with Offset," in *Computational Intelligence Methods and Applications - IEEE*, Istanbul, 2005.
- [11] L. Das, "Prediction of Inverse Kinematics Solution of a Redundant Manipulator using ANFIS," National Institute of Technology, Rourkela, Master Thesis 2012.
- [12] E. Yazid, E. Rijanto, "Invers Kinematic Mapping of 6 DOF Articulator using ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)," in *Seminar Nasional Teknologi Simulasi 2007*, Yogyakarta, 2007, pp. F31-F38.
- [13] S. Alavandar and M.J. Nigam, "Inverse Kinematics Solution of 3DOF Planar Robot using ANFIS," *Int. J. of Computers, Communications & Control*, vol. III, pp. 150-155, 2008.
- [14] R. Koker, "A neuro-genetic approach to the inverse kinematics solution of robotic manipulators," *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, pp. 2784-2794, Juli 2011.
- [15] S. Alavandar, M. J. Nigam, "Neuro-Fuzzy based Approach for Inverse Kinematics Solution of Industrial Robot Manipulators," *Int. J. of Computers, Communications & Control*, vol. III, No. 3, pp. 224-234, 2008.
- [16] J. Ramírez A., and A. Rubiano F., "Optimization of Inverse Kinematics of a 3R Robotic Manipulator using Genetic Algorithms," in *World Academy of Science, Engineering and Technology* 59, 2011, pp. 1425-1430.