

## Pengembangan Sistem Kalibrasi Posisi dan Orientasi Robot Berbasis Photogrammetry

Indrawanto, Vani Virdyawan

Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara  
Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesa 10, Bandung 40132  
E-mail: indrawanto@tekprod.ms.itb.ac.id

### Abstrak

Kalibrasi robot adalah cara untuk mengetahui ketelitian, ketepatan dan kecermatan gerak robot. Secara umum kalibrasi robot lebih rumit untuk dilakukan dibanding kalibrasi mesin perkakas karena menyangkut gerak dalam ruang, 3(tiga) linier dan 3(tiga) rotasi. Salah satu penggunaan kalibrasi robot adalah untuk uji penerimaan (*acceptance test*). Berbagai teknik kalibrasi robot telah dikembangkan untuk mencapai tujuan tersebut. Salah satu teknik untuk mengkalibrasi robot adalah dengan menggunakan kamera atau dengan teknik photogrammetry. Pada teknik yang dikembangkan ini kamera diletakkan secara statik pada posisi tertentu sedangkan pada *end-effector* robot diletakkan penanda (*marker*). Marker tersebut berupa penanda berbentuk lingkaran-lingkaran dengan jarak tertentu yang dipegang oleh *end-effector* robot. Saat robot digerakkan maka marker akan berpindah posisi dan kamera akan mengambil beberapa gambar marker pada posisi dan orientasi tertentu. Dengan menggunakan hubungan antara jarak piksel pada citra marker yang tertangkap kamera dan jarak sesungguhnya pada marker maka dapat dicari jarak perpindahan marker saat robot bergerak. Sistem kalibrasi robot berbasis kamera yang dikembangkan saat ini baru dikembangkan untuk gerak dalam bidang 2 (dua) dimensi. Sistem kalibrasi ini dikembangkan agar dapat menjadi alat bantu untuk uji penerimaan robot maupun untuk alat bantu peningkatan unjuk kerja sistem kontrol robot.

**Keywords:** Robot, kalibrasi, photogrammetry, sistem kontrol, *acceptance test*

### Pendahuluan

Kalibrasi robot dapat dimanfaatkan untuk berbagai tujuan. Ketelitian posisi statis dan dinamis robot telah menjadi penghambat untuk pengenalan teknik pemrograman off-line. Teknik ini membutuhkan posisi robot untuk dapat diprediksi dengan ketelitian yang memadai. Kalibrasi robot akan meningkatkan ketelitian posisi. Aplikasi lain yang penting dari robot kalibrasi adalah penggunaannya sebagai diagnostic alat produksi, pemeliharaan dan saat uji penerimaan (*acceptance test*) robot. Ketidak-telitian dan keausan di komponen tertentu dari robot dapat diidentifikasi dengan menggunakan pengukuran yang teliti dengan model kinematik yang sesuai.

Saat ini terdapat sejumlah sistem pengukuran robot yang tersedia secara komersial, masing-masing dengan berbagai penerapannya dan keperluannya. Namun, sistem yang portabel, teliti dan murah sangat langka didapat.

Pada penelitian ini kami mengembangkan prototipe sebuah sistem pengukuran sederhana yang diharapkan dapat mengisi kekosongan ini. Sistem yang dikembangkan berbasis kamera tunggal yang

diletakkan pada posisi statis dan pada lengan robot ditambah obyek referensi yang akan ikut bergerak sesuai gerakan robot dalam ruang kerjanya.

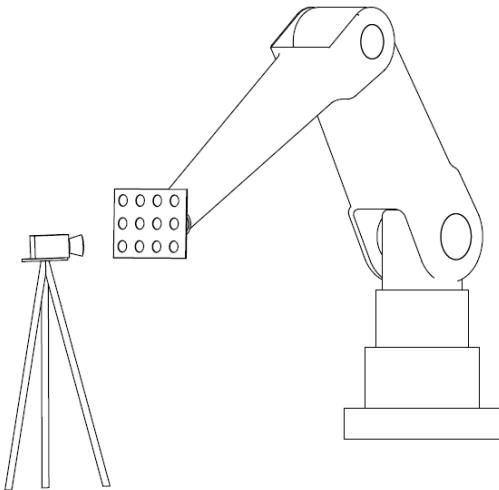
Beberapa peniliti telah menggunakan kamera tunggal yang diletakkan pada tangan robot untuk melakukan kalibrasi kinematik robot (Albada et.al 1994, Meng and Zhuang 2001). Kelemahan sistem tersebut adalah adanya keterbatasan pada massa kamera yang dipasang pada lengan robot. Umumnya hanya digunakan kamera kecil dan ringan pada metoda tersebut, sedangkan kamera dengan akurasi tinggi umumnya berukuran besar dan berat sehingga tidak mudah digunakan.

Pada makalah ini akan disajikan hasil pengujian kalibrasi kamera yang akan digunakan sebagai basis pada sistem kalibrasi posisi dan orientasi robot.

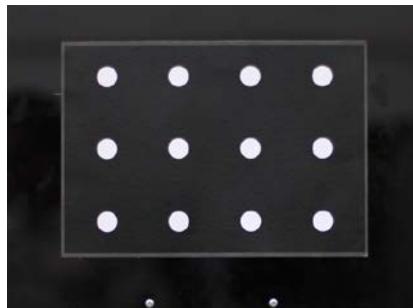
### Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Sistem pengukuran yang dikembangkan dalam makalah ini dirancang agar dapat digunakan secara praktis untuk mengukur posisi dan orientasi serta keterulangannya. Di samping itu sistem ini

memerlukan biaya relatif rendah, portabel dan diharapkan mudah dioperasikan oleh tenaga non-ahli dan cukup handal digunakan pada lingkungan industri. Gambar 1 menunjukkan skema pengukuran posisi dan orientasi robot. Pada pengukuran ini digunakan satu kamera pada posisi tetap dan pada lengan robot dipasangkan suatu obyek acuan. Obyek acuan digunakan untuk mengukur perpindahan posisi dan orientasi sekaligus untuk kalibrasi kamera.



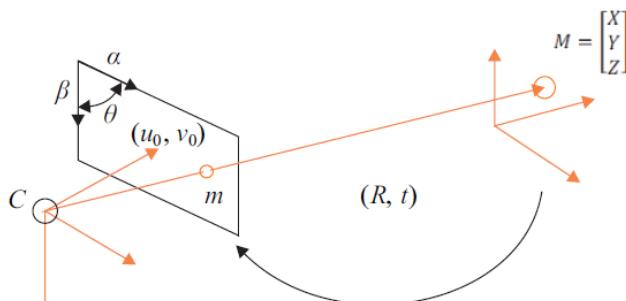
Gambar 1. Skema pengukuran posisi dan orientasi robot dengan kamera tunggal.



Gambar 2. Obyek acuan yang terlihat melalui kamera.

Untuk kalibrasi kamera digunakan mesin CNC Maho 500W dan robot Yaskawa Motoman MH80 untuk pengujian metoda yang dikembangkan.

#### Model Kamera Lubang Jarum (H. Malm dan A. Heyden 2003)



Gambar 3. Model kamera lubang-jarum (*pin-hole camera*)

Sebuah titik 2D dilambangkan dengan  $m = [u, v]^T$ . Sebuah titik 3D dilambangkan oleh  $M = [X, Y, Z]^T$ . Digunakan notasi  $\tilde{x}$  untuk menunjukkan vektor yang diperluas dengan menambahkan 1 pada baris akhir. Elemen:  $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$  dan  $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ . Sebuah kamera dimodelkan seperti lubang jarum (lihat Gambar 3). Gambar 3D titik  $M$ , dilambangkan dengan  $m$  dibentuk oleh sinar optik dari  $M$  melewati pusat optik  $C$  dan memotong bidang gambar. Tiga titik  $M$ ,  $m$ , dan  $C$  berada pada satu garis lurus.

Gambar 3 menunjukkan ilustrasi bidang gambar yang terletak antara titik pandang dan pusat optik, yang secara matematis setara ke setup fisik di mana bidang gambar berada di sisi lain terhadap pusat optik. Hubungan antara titik 3D  $M$  dan proyeksi citra  $m$  diberikan oleh

$$s\tilde{m} = A[R \quad t]\tilde{M} \equiv P\tilde{M}, \quad (1)$$

dengan

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dan

$$P = A[R \quad t]$$

yang mana  $s$  adalah faktor skala,  $(R, t)$  disebut parameter ekstrinsik, yang berupa rotasi dan translasi yang menghubungkan sistem koordinat bumi dengan sistem koordinat kamera, dan  $A$  disebut matriks intrinsik kamera, dengan  $(u_0, v_0)$  koordinat titik utama,  $\alpha$  dan  $\beta$  faktor skala pada sumbu  $u$  dan  $v$  citra, dan  $\gamma$  parameter yang menyatakan kemiringan dua sumbu citra. Matriks  $3 \times 4 P$  disebut matriks proyeksi kamera, yang terdiri atas parameter intrinsik dan ekstrinsik. Pada Gambar 3, sudut antara dua sumbu citra dinyakan dengan  $\theta$ , dan  $\gamma = \alpha \cot \theta$ . Bila piksel-piksel saling tegak lurus, maka  $\theta = 90^\circ$  dan  $\gamma = 0$ .

Tujuan kalibrasi kamera adalah untuk menentukan parameter transformasi antara obyek pada ruang 3D dan citra 2D yang teramatasi oleh kamera dari informasi visual (citra). Transformasi ini meliputi:

- Parameter ekstrinsik (atau parameter eksternal): orientasi (rotasi) dan posisi (translasi) dari kamera, yakni  $(R, t)$ ;
- Parameter intrinsik (atau parameter internal): karakteristik kamera, yakni  $(\alpha, \beta, \gamma, u_0, v_0)$ .

Matriks rotasi ini walaupun terdapat 9 elemen, tetapi hanya memiliki 3 derajat kebebasan. Vektor translasi  $t$  memiliki 3 parameter, sehingga terdapat 6 parameter extrinsik dan 5 intrinsik yang secara keseluruhan menjadi 11 parameter.

#### Estimasi Linier Matrix Proyeksi Kamera

Berdasarkan persamaan proyeksi (1), maka dapat dilakukan estimasi parameter kamera. Masalah ini cukup tidak linier bila  $A$ ,  $R$  dan  $t$  diestimasi secara

langsung. Namun, bila sebaliknya estimasi matrix proyeksi kamera  $P$  mungkin untuk dilakukan hingga didapatkan solusi linier seperti berikut ini.

Untuk hubungan masing-masing titik 2D-3D  $m_i = (u_i, v_i) \leftrightarrow M_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ , maka dapat diturunkan 2 persamaan (Pers. (2) dan Pers. (3)) berdasarkan Pers. (1):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & u_i X_i & u_i Y_i & u_i Z_i & u_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & v_i X_i & v_i Y_i & v_i Z_i & v_i \end{bmatrix}}_G p = 0 \quad (2)$$

dimana  $p = [p_{11}, p_{12}, \dots, p_{34}]^T$  dan  $0 = [0, 0]^T$ . Untuk  $n$  titik yang cocok, maka semua persamaan dapat digabung bersama menjadi:

$$Gp = 0 \quad \text{dengan } G = [G_1^T, \dots, G_n^T]^T \quad (3)$$

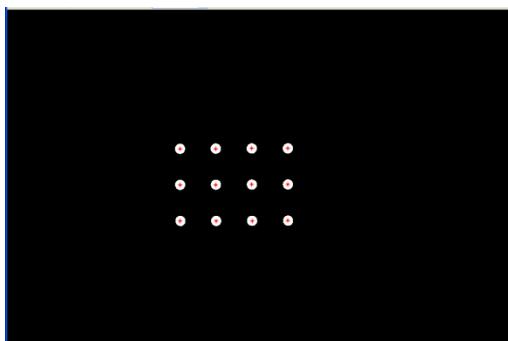
Matriks  $G$  adalah matriks  $2n \times 12$ . Matriks proyeksi sekarang dapat diselesaikan dengan

$$\min_p \|Gp\|^2 \text{ terhadap } \|p\| = 1$$

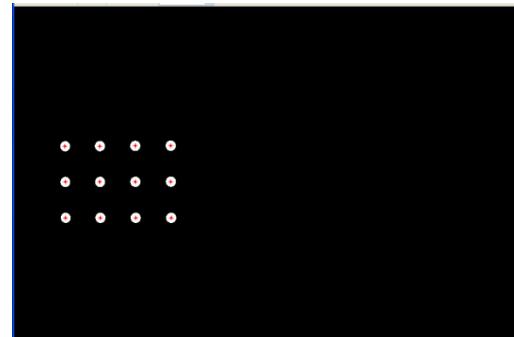
Selanjutnya matriks proyeksi  $P$  dapat diperoleh dengan menggunakan teknik *Singular Value Decomposition* untuk mendapatkan nilai matriks proyeksi terbaik (Golub dan van Loan, 1996)

## Hasil Pengujian dan Analisis

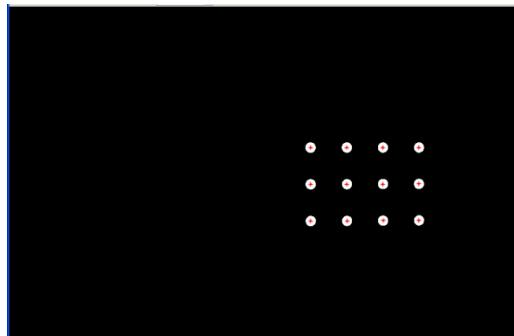
Pengambilan gambar dilakukan pada mesin CNC yang memiliki ketelitian 0,01 mm dan dilakukan sebanyak 6 kali. Citra awal kemudian dijadikan sebagai acuan koordinat, gambar berikutnya diambil setelah obyek acuan digerakkan pada arah sumbu  $X$  dan  $Y$  tertentu. Citra yang diperoleh kemudian diolah dalam bentuk gambar biner, karena obyek acuan memiliki bentuk lingkaran, maka proses penentuan koordinat ditentukan berdasarkan posisi titik pusat lingkaran. Gambar 4 hingga Gambar 9 menunjukkan gambar yang telah dilakukan pemrosesan.



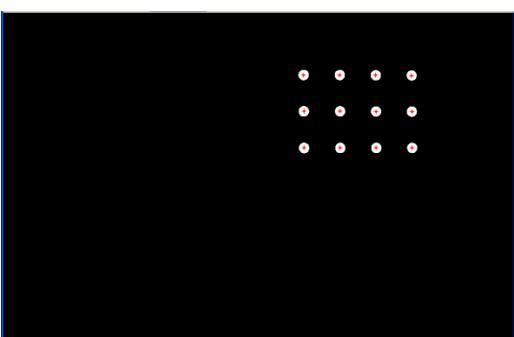
Gambar 4 Posisi 0, X = 0, Y = 0



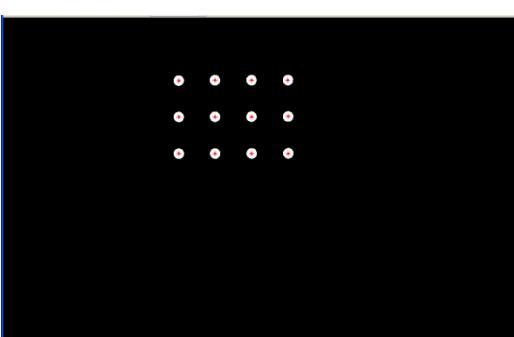
Gambar 5 Posisi 1, X = -240 dan Y = 0



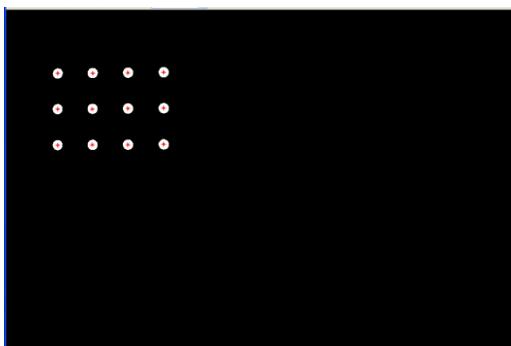
Gambar 6 Posisi 2, X = 240, Y = 0



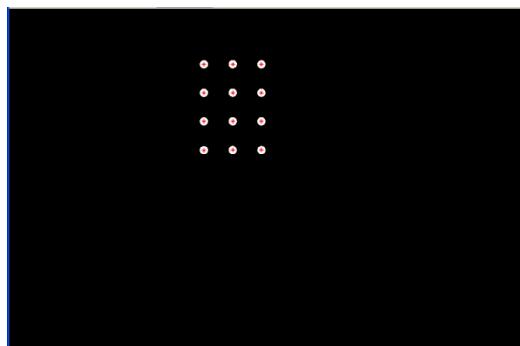
Gambar 7 Posisi 3, X = 240, Y = -150



Gambar 8 Posisi 4, X = 0, Y = -150



Gambar 9 Posisi 5, X = -240, Y = -150



Gambar 11 Posisi 1, X = -100, Y = 0

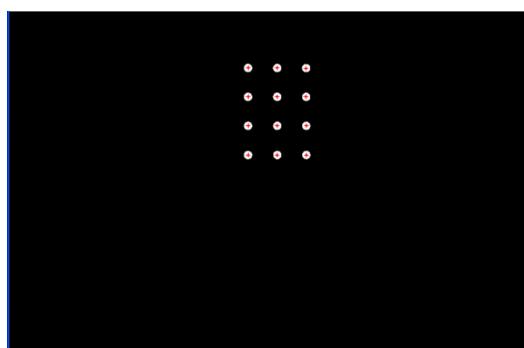
Posisi 0 merupakan titik awal koordinat, sehingga diasumsikan bahwa obyek acuan yang bergerak berada pada bidang yang sama. Berdasarkan asumsi tersebut, maka hubungan antara posisi pada piksel dengan posisi obyek acuan sesuai dengan matriks  $P$  yang diperoleh dari posisi 0. Tabel 1 menunjukkan posisi titik-titik obyek acuan berdasarkan hasil perhitungan.

Tabel 1 Tabel Posisi yang diperoleh berdasarkan perhitungan

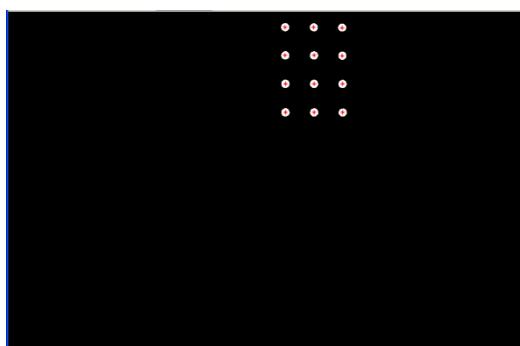
1		1		2		3		4		5	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
0.12	0.03	-238.99	0.46	240.98	0.08	241.00	-148.91	0.57	-149.40	-238.58	-9.50
-0.05	69.83	-238.90	0.03	241.25	-0.02	241.27	-149.65	0.39	-149.87	-237.97	-149.02
0.13	139.99	-238.82	-0.40	241.00	-0.29	241.19	-150.04	0.04	-150.16	-237.36	-288.19
69.89	-0.04	-240.04	0.27	240.62	0.43	240.23	-148.23	0.51	-149.41	-239.80	-9.67
69.90	69.93	-240.30	0.02	240.53	-0.02	240.50	-149.31	0.16	-150.05	-239.42	-149.38
70.08	140.26	-240.22	-0.40	240.28	-0.64	240.59	-149.87	-0.01	-150.34	-239.04	-288.74
140.37	0.06	-240.90	0.10	239.03	0.60	238.59	-147.55	0.10	-149.24	-240.67	-9.84
140.20	70.04	-240.81	0.02	239.13	-0.19	239.03	-148.62	0.10	-149.88	-240.16	-149.57
140.20	140.19	-240.73	-0.06	239.05	-0.81	239.29	-149.36	0.10	-149.99	-239.84	-288.95
210.84	0.16	-241.23	-0.08	237.28	0.59	236.78	-146.70	-0.13	-149.07	-240.28	-149.38
210.67	70.14	-241.32	0.02	237.20	-0.20	237.05	-148.12	0.04	-149.71	-240.73	-149.93
210.50	140.29	-241.06	0.12	237.30	-1.16	237.49	-149.02	0.22	-149.82	-240.82	-149.94
<b>Delta (Est)</b>		-240.28	0.01	239.47	-0.13	239.42	-148.78	0.17	-149.74	-239.56	-149.34
<b>Delta (true)</b>		-240.00	0.00	240.00	0.00	240.00	-150.00	0.00	-150.00	-240.00	-150.00
<b>Error</b>		-0.28	0.01	-0.53	-0.13	-0.58	1.22	0.17	0.26	0.44	0.66

Dari hasil perhitungan dapat diperoleh bahwa kesalahan maksimal estimasi dari perubahan posisi adalah sebesar 1,22 mm pada sumbu  $Y$  posisi 3 dan kesalahan rms adalah 0,54 mm.

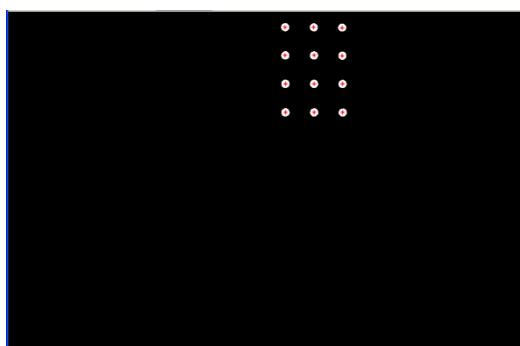
Dari hasil kalibrasi tersebut kemudian dilakukan pengujian pada robot industri. Gambar 10 hingga Gambar 16 menunjukkan hasil pengolahan citra dari obyek acuan.



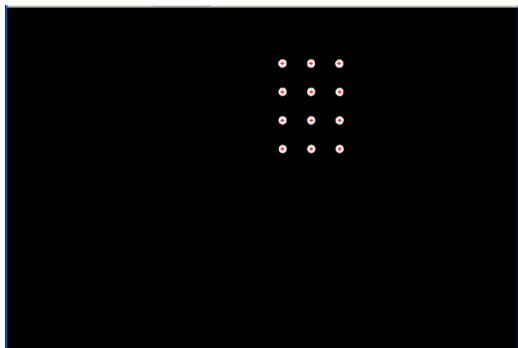
Gambar 10 Posisi 0, X = 0, Y = 0



Gambar 14 Posisi 4, X = 100, Y = -100



Gambar 14 Posisi 4, X = 100, Y = -100



Gambar 15 Posisi 5, X = 100, Y = 0

Berdasarkan metode awal, dilakukan proses perhitungan perubahan posisi pada robot yang ditunjukkan pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2 Tabel posisi koordinat robot

0		1		2		3		4		5	
x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
-0.17	0.19	-99.19	-0.38	-98.58	-100.43	0.66	-99.84	100.16	-99.93	99.67	0.38
-0.17	69.96	-99.22	-0.32	-98.61	-100.67	0.44	-99.69	100.19	-100.06	99.71	0.55
0.06	139.91	-99.26	-0.49	-98.87	-100.68	0.21	-99.54	100.01	-99.96	99.52	0.72
0.07	210.05	-99.07	-0.66	-98.90	-100.92	0.21	-99.61	99.82	-99.86	99.33	0.66
70.24	-0.02	-99.53	-0.38	-98.95	-100.60	0.40	-100.01	100.02	-99.65	99.57	0.60
70.11	69.87	-99.57	-0.54	-98.99	-101.07	0.40	-99.86	100.28	-100.01	99.61	0.55
69.99	139.95	-99.38	-0.71	-98.80	-101.08	0.63	-99.71	100.32	-99.91	99.64	0.72
70.08	209.98	-99.41	-0.66	-99.06	-101.09	0.40	-99.55	100.13	-99.81	99.45	0.66
140.00	0.00	-99.65	-0.60	-98.88	-100.77	0.82	-99.96	100.10	-99.59	99.68	0.83
139.97	70.01	-99.68	-0.77	-98.91	-101.24	0.59	-100.03	100.14	-99.95	99.72	0.77
139.93	139.98	-99.72	-0.72	-98.95	-101.25	0.59	-99.66	100.18	-99.85	99.53	0.72
139.89	210.13	-99.53	-0.66	-98.99	-101.04	0.37	-99.50	100.21	-99.75	99.35	0.66
Delta (Est)	-99.43	-0.57	-98.87	-100.90	0.48	-99.75	100.13	-99.86	99.56	0.65	
Delta (Command)	-100.00	0.00	-100.00	-100.00	0.00	-100.00	100.00	-100.00	100.00	0.00	
Error	0.57	-0.57	1.13	-0.90	0.48	0.25	0.13	0.14	-0.44	0.65	

Dari Tabel 2 secara umum sebagian besar kesalahan di bawah batas kesalahan rms hasil pengujian dengan mesin perkakas CNC. Secara umum pada pengujian posisi robot ini dapat disimpulkan bahwa robot memiliki ketelitian gerak sesuai dengan spesifikasi pabrik yakni  $\pm 0,07$  mm.

## Kesimpulan

Sistem kalibrasi posisi dan orientasi robot berbasis photogrammetry telah dikembangkan dan disajikan pada makalah ini. Sistem yang dikembangkan masih dalam tingkat prototype yang mana masih banyak beberapa penyederhanaan dalam analisis. Namun, dari hasil pengujian dan percobaan pada robot industri, sistem ini telah dapat memberikan gambaran tentang ketelitian gerak robot. Untuk penelitian lebih lanjut akan dilakukan analisis lebih dalam yang meliputi estimasi parameter eksternal dan internal serta pengukuran berbasis dual kamera.

## Referensi

G.D. van ALBADA, J.M. LAGERBERG and A. VISSER, Eye in hand Calibration, Industrial Robot 21, 6, pp.14-17 (1994)

Y. Meng dan H. Zhuang, Self-Calibration of Camera-Equipped Robot Manipulators, The International Journal of Robotics Research Vol. 20, No. 11, November 2001, pp. 909-921, (2001)

H. Malm dan A. Heyden, Simplified Intrinsic Camera Calibration and Hand-Eye Calibration for Robot Vision, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems Las Vegas, Nevada · October 2003 (2003)

G.H. Golub dan C.F. van Loan, Matrix Computations. The John Hopkins, University Press, Baltimore, Maryland, 3 edition, (1996)