

Peningkatan Unjuk Kerja Sistem Sensor Garis Pemandu Pada Robot Kontes

Nanang Sulistiyanto

Abstract—Autonomous mobile robots competing during the Indonesian Domestic Robot Contest generally move by tracking a guidance line on the field based on information obtained from optical sensor systems. High intensity and non-homogenously distributed spotlights of television cameras have been the cause of most of the autonomous machines not to be able to move fast and accurately. As a solution, basic principles of Dual Tone Multi Frequency (DTMF) that has been successfully applied on telecommunication systems are adopted to increase the immunity of the sensor system from the disturbances. The objective of this research is to design a sensor system which is capable of detecting a guidance line as thin as 1 mm at a maximum speed of 4 m/s. The simulation results show that the system is relatively immune from 50 Hz interferences. The accuracy of the system begins to be significantly influenced by random noise on signal to noise ratio about 0 dB but the system produces an accuracy of nearly 100% for carrier frequencies above 18 kHz

Index Terms— butterworth filter, contest robot, digital signal processing, microcontroller, simulation.

Abstrak— Robot otomatis pada Kontes Robot Indonesia (KRI) umumnya bergerak mengikuti garis-garis pemandu di lapangan berdasarkan suatu sistem sensor cahaya. Pengaruh lampu sorot kamera televisi yang terlalu terang dan tidak merata menjadi permasalahan utama kegagalan mayoritas robot-robot tersebut untuk bergerak dengan kecepatan tinggi dan akurat. Sebagai solusi, prinsip kerja sistem Dual Tone Multi Frequency (DTMF) pada sistem telekomunikasi diadopsi ke dalam sistem sensor pada sistem pelacak garis robot tersebut untuk meningkatkan ketahanan sistem terhadap pengaruh cahaya luar. Penelitian ini bertujuan untuk merancang suatu sistem sensor yang mampu mendeteksi suatu garis selebar 1 mm untuk kecepatan maksimum robot sebesar 4 m/s di bawah lingkungan yang penuh derau (*noise*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem relatif kebal terhadap pengaruh interferensi 50 Hz. Keakuratan sistem mulai terpengaruh oleh derau acak secara signifikan pada SNR (*Signal to Noise Ratio*) sekitar 0 dB tetapi sistem tersebut dapat menghasilkan keakuratan mendekati 100% untuk frekuensi pembawa di atas 18 kHz.

Kata Kunci— filter butterworth, mikrokontroler, pemrosesan sinyal digital, robot kontes, simulasi.

Naskah diterima pada tanggal 20 Mei 2007.

Nanang Sulistiyanto adalah dari Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang. Untuk kontak dengan penulis dapat dihubungi nomor telepon 0341-554166 dan email nnst@brawijaya.ac.id.

I. PENDAHULUAN

Robot-robot umumnya dilengkapi suatu sistem sensor untuk mendeteksi objek-objek di sekitarnya agar robot dapat bergerak dengan cepat dan akurat ke sasaran tanpa membentur objek penghalang. Berbagai sistem kontrol canggih telah diterapkan, seperti logika fuzzy (Wang & Lee, 2003) dan jaringan saraf tiruan (Barshan dkk., 2000). Tetapi, unjuk kerja sistem kontrol dengan metode apapun sangat bergantung pada keakuratan informasi yang diberikan sistem sensor. Dengan demikian, keakuratan sensor merupakan faktor esensial bagi robot otomatis.

Sistem sensor yang paling canggih ialah sistem kamera yang dapat digunakan untuk mendeteksi objek tiga dimensi, seperti yang telah diimplementasikan dalam penelitian-penelitian mutakhir tentang robot berkamera (Das, 2002; Saripalli, 2003). Sebagai alternatif, sinar laser (Fredlund, 2002) dan sonar (Barshan, 2000; McKerrow, 2001) dapat juga digunakan untuk memindai objek-objek penghalang. Tetapi, kompleksitas sistem dan kebutuhan biaya yang relatif tinggi menjadi kendala utama dalam pengimplementasiannya pada Kontes Robot Indonesia (KRI) sehingga sistem sensor yang sangat sederhana umumnya dipilih sebagai alternatif utama.

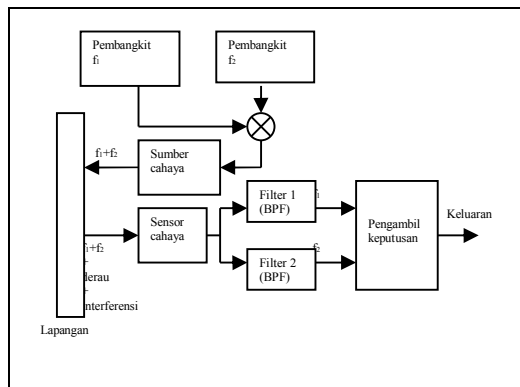
Dalam KRI, robot otomatis harus mampu mendeteksi garis-garis pemandu pada lapangan yang biasanya memiliki lebar 3 cm (Asia-Pacific Robot Contest, 2005). Sistem sensor yang umum digunakan ialah pasangan sumber cahaya (seperti LED) dan sensor cahaya (seperti fotodiode, fototransistor, atau LDR). Metode paling sederhana dalam pendeteksian garis ialah pendeteksian intensitas cahaya pantul yang diterima sensor secara langsung. Perbedaan warna antara lapangan (hijau tua) dan garis pemandu (putih) menyebabkan perbedaan intensitas cahaya pantul yang teramati pada sensor sebagai perubahan level tegangan.

Kelemahan sistem sensor sederhana tersebut ialah sensitivitas sistem yang tinggi terhadap pengaruh cahaya eksternal. Cahaya eksternal dengan intensitas yang tinggi, seperti cahaya dari lampu sorot kamera televisi, dapat menyebabkan kesalahan identifikasi garis akibat penyimpanan level tegangan sensor yang terlalu tinggi. Hal ini dapat diatasi dengan menutup rapat sistem sensor sedemikian hingga tidak ada cahaya eksternal yang masuk. Akan tetapi, upaya ini sulit dilakukan oleh mayoritas tim peserta KRI karena kemampuan yang

terbatas dalam pembuatan konstruksi mekanik robot.

Salah satu solusi yang dapat dilakukan ialah penerapan prinsip kerja DTMF (*Dual Tone Multi Frequency*) yang telah digunakan secara luas pada sistem telekomunikasi (Subramaniam dkk., 2003; Xiao dkk., 2005) ke dalam sistem sensor robot. Ide dasar solusi ini ialah penurunan sensitivitas sensor sehingga sistem relatif kebal terhadap pengaruh cahaya eksternal intensitas tinggi. Tetapi, hal ini dapat mengakibatkan amplitudo sinyal pantul menjadi sangat kecil dan bahkan terkubur oleh derau. Untuk mengatasi hal ini, informasi intensitas sinyal pantul ditumpangkan pada dua buah sinyal pembawa yang berbeda seperti pada sinyal DTMF. Sistem sensor tersebut diilustrasikan dalam Gambar 1.

Mekanisme pengestraksian sinyal pembawa dari sinyal pengganggu dapat dijelaskan dalam kawasan frekuensi. Jika kedua sinyal pembawa (f_1 dan f_2) dan sinyal penginterferensi memiliki komponen frekuensi yang berjauhan, sinyal pembawa dengan mudah dapat direkonstruksi dengan menggunakan *band pass filter* (BPF). Derau umumnya dimodelkan sebagai derau acak monokromatik (*white noise*) yang memiliki komponen frekuensi yang tersebar merata dalam kawasan frekuensi. Meskipun energi derau semacam ini lebih besar dari energi sinyal pembawa, komponen frekuensi derau pada f_1 dan f_2 bisa jadi lebih kecil dari komponen frekuensi sinyal pembawa sehingga penurunan kualitas sinyal pembawa tidak sampai merusak informasi yang dikandungnya. Lebih lanjut, kemungkinan derau acak untuk mengubah secara serentak kedua komponen frekuensi tersebut relatif kecil sehingga gangguan derau acak, secara teoritis, juga relatif kecil. Hal ini merupakan kunci ketahanan sistem DTMF terhadap derau.



Gambar 1 Sistem Pendeteksian Garis

Selain permasalahan pemilihan frekuensi pembawa yang tepat, lebar pita (*bandwidth*) kedua filter dalam Gambar 1 harus ditentukan dengan cermat karena terkait dengan tanggapan transien filter. Lebar pita yang terlalu sempit akan sangat memperkecil pengaruh derau acak tetapi mengakibatkan filter terlampaui lambat untuk merespon perubahan intensitas cahaya yang terjadi. Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan kriteria-kriteria yang dapat dijadikan

pegangan dalam pengimplementasian suatu sistem pelacak garis berkecepatan tinggi yang handal.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan berdasarkan simulasi yang dibuat dengan menggunakan Matlab versi 6.5 pada komputer pribadi (Pentium 4) berbasis sistem operasi Windows XP. Robot diasumsikan dapat bergerak dengan kecepatan maksimum 4 m/s. Asumsi ini diambil untuk menjamin bahwa sistem sensor memiliki tanggapan yang memadai karena berdasarkan pengamatan robot-robot otomatis tercepat dalam KRI memiliki kecepatan sekitar 2 sampai 3 m/s. Lebih lanjut, agar sistem sensor dapat menunjang sistem kontrol robot untuk bergerak di atas garis pemandu secara halus (tidak terpatah-patah), sistem sensor diasumsikan mampu mengamati garis setebal 1 mm.

Karena warna garis (putih) lebih terang dari warna lapangan (hijau tua), pergerakan sensor menuju garis akan menghasilkan penguatan amplitudo sinyal. Dalam simulasi, digunakan kasus terburuk yaitu amplitudo sinyal meningkat secara tiba-tiba begitu sensor berada di atas garis. Berdasarkan pengamatan dari sistem sensor robot otomatis milik tim robot Universitas Brawijaya, perubahan bidang pantul tersebut dapat menghasilkan kenaikan amplitudo sekitar dua sampai empat kali, bergantung jarak sensor terhadap bidang pantul. Dalam simulasi ini digunakan kasus terburuk, yaitu kenaikan amplitudo sebesar dua kali.

III. HASIL PENELITIAN

A. ANALISIS TEORITIS

Frekuensi pembawa dapat ditentukan berdasarkan Persamaan 1. Makin besar nilai N_λ makin besar tingkat kepercayaan terhadap hasil pengukuran sensor karena hasil pengukuran dalam selang Δx_{min} , secara teoritis, dapat dikonfirmasi sebanyak $2N_\lambda$ kali (sebanyak amplitudo negatif dan positif yang muncul). Tetapi, hal ini akan memerlukan frekuensi pembawa yang semakin tinggi.

$$f_p = N_\lambda \frac{v_{maks}}{\Delta x_{min}} \quad 1$$

dengan f_p : frekuensi pembawa

N_λ : jumlah panjang gelombang

v_{maks} : kecepatan robot maksimum

Δx_{min} : lebar minimum yang terdeteksi

sensor

Berdasarkan teori tentang respon transien filter, nilai f_p ketika $N_\lambda = 1$ merupakan lebar pita minimum filter BPF (*Band Pass Filter*) agar filter mampu mengikuti perubahan (mendadak) amplitudo sinyal dalam selang Δx_{min} . Dengan demikian, jarak kedua frekuensi pembawa f_1 dan f_2 harus memenuhi Persamaan 2. Lebih lanjut, agar f_2 tidak terinterferensi oleh harmonisa f_1 , f_2 dibuat bukan merupakan kelipatan bulat dari f_1 . Hal ini dapat dilihat dalam Persamaan 3 dan 4.

$$f_2 - f_1 \geq \frac{v_{maks}}{\Delta x_{min}} \quad 2$$

$$f_1 = N_\lambda \frac{v_{maks}}{\Delta x_{min}} \quad 3$$

$$f_2 = f_1 + \alpha \frac{v_{maks}}{\Delta x_{min}} = (N_\lambda + \alpha) \frac{v_{maks}}{\Delta x_{min}}, \quad 1 < \alpha < 2 \quad 4$$

dengan f_1, f_2 : frekuensi pembawa pertama dan kedua

α : faktor pengali tak-bulat

Berdasarkan teori pencuplikan dan rekonstruksi sinyal, implementasi digital sistem ini memerlukan frekuensi pencuplikan f_s minimum sebesar dua kali f_2 . Untuk menghasilkan nilai puncak sinyal pembawa yang relatif konstan, direkomendasikan penggunaan f_s yang cukup besar, misal sepuluh kali f_2 seperti ditunjukkan dalam Persamaan 5.

$$f_s = 10f_2 \quad 5$$

dengan f_s : frekuensi pencuplikan

Hasil-hasil penghitungan untuk beberapa nilai N_λ , $v_{maks} = 4$ m/s, $\Delta x_{min} = 1$ mm, $\alpha = 1,7$ ditunjukkan dalam Tabel 1. Frekuensi pencuplikan di atas 100 kHz (dan kurang dari 1 MHz) dapat diimplementasikan dengan menggunakan ADC (*Analog to Digital Converter*) tipe pendekatan berturutan (*successive approximation*) berkecepatan tinggi.

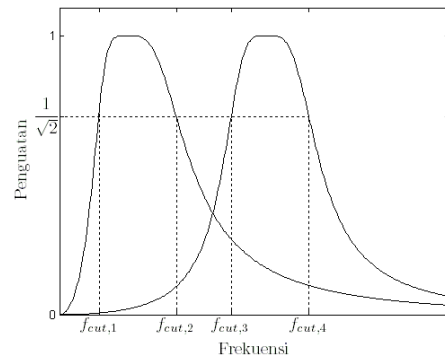
TABEL I ALTERNATIF FREKUENSI PEMBAWA

N_λ	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_s (kHz)
1,0	4000	10800	108
1,5	6000	12800	128
2,0	8000	14800	148
2,5	10000	16800	168
3,0	12000	18800	188
3,5	14000	20800	208
4,0	16000	22800	228
4,5	18000	24800	248
5,0	20000	26800	268

B. SIMULASI

1) PEMFILTERAN

Filter yang digunakan dalam penelitian ini adalah dua buah filter IIR (*Infinite Impulse Response*) Butterworth orde 2 yang dirancang dengan menggunakan *Signal Processing Toolbox* dari Matlab. Penerapan orde filter yang relatif rendah ini bertujuan untuk kemudahan dalam pengimplementasian dalam sistem digital *real-time* yang menuntut kecepatan proses. Kedua filter ini memiliki lebar pita sebesar $v_{maks}/\Delta x_{min}$ dan masing-masing memiliki frekuensi tengah f_1 dan f_2 . dengan jarak $2,7 v_{maks}/\Delta x_{min}$. Tanggapan kedua filter tersebut diilustrasikan dalam Gambar 2.



Gambar 2 Tanggapan frekuensi filter

Tanggapan frekuensi kedua filter ini tumpang tindih pada daerah *stop band* dengan peredaman amplitudo yang relatif tinggi karena jarak kedua frekuensi tengah kedua filter tersebut cukup jauh. Dengan demikian, kedua frekuensi pembawa tersebut terjamin tidak saling menginterferensi.

2) PEMODELAN SINYAL DAN DERAU

Sistem sensor disimulasikan untuk mendeteksi garis pemandu selebar 1 mm sehingga sinyal masukan dimodelkan sebagai sinyal sinusoida yang tiba-tiba diperkuat dua kali dalam suatu selang selebar 250 μ s seperti dalam Persamaan 6 dan Persamaan 7. Dalam simulasi ditetapkan $V_p = 1$, $A_G = 2$, $\Delta t = 250 \mu$ s, dan parameter lainnya seperti yang ditentukan dalam Tabel 1. Bentuk gelombang sinyal masukan dengan frekuensi pembawa 4 kHz dan 10,8 kHz diilustrasikan dalam Gambar 3.

$$s_{in}(t) = \begin{cases} V_p (\sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t), & t < t_0 \\ A_G V_p (\sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t), & t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t \\ V_p (\sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t), & t > t_0 + \Delta t \end{cases} \quad 6$$

$$\Delta t = \frac{\Delta x_{min}}{v_{maks}} \quad 7$$

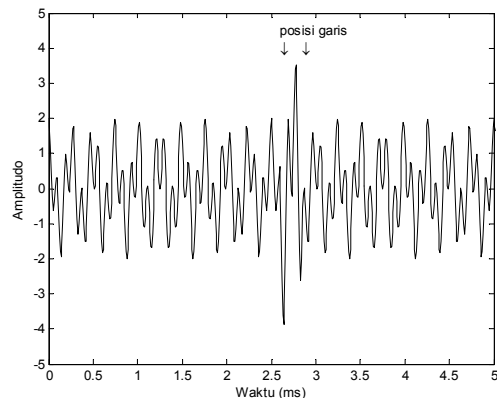
dengan s_{in} : fungsi sinyal masukan

V_p : amplitudo komponen sinyal pembawa

A_G : penguatan ketika sensor di atas garis

t_0 : waktu ketika sensor mulai masuk garis

Δt : selang waktu saat sensor di atas garis



Gambar 3 Sinyal masukan yang bersih

Sinyal gangguan terdiri dari dua bagian, yaitu sinyal penginterferensi 50 Hz (dalam Persamaan 8) dan derau acak (dalam Persamaan 9). Sinyal penginterferensi dibuat sampai harmonisa ke-10 dengan amplitudo yang sama untuk setiap harmonisa. Level sinyal penginterferensi atau derau acak diatur sedemikian rupa sehingga menghasilkan SNR (*Signal to Noise Ratio*) tertentu dengan menggunakan metode tabulasi.

$$N_{AC}(t) = \sum_{n=1}^N V_n \sin(2n\pi f_{AC} t) \quad 8$$

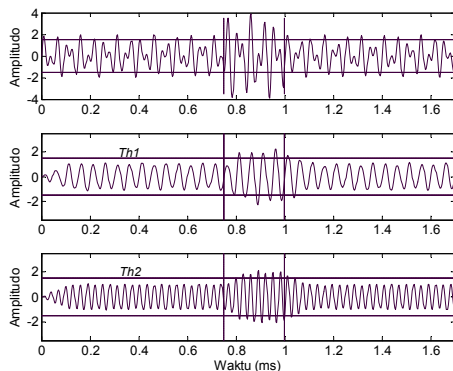
dengan N_{AC} : sinyal penginterferensi
 V_n : amplitudo harmonisa ke- n
 f_{AC} : frekuensi dasar sinyal penginterferensi

$$N_R = V_R w(t) \quad 9$$

dengan N_R : derau acak
 V_R : amplitudo derau acak
 $w(t)$: fungsi acak monokromatis (*white noise*)

3) KRITERIA PENGAMBILAN KEPUTUSAN

Hasil pemfilteran sinyal masukan yang bersih diberikan dalam Gambar 4. Kurva yang paling atas merupakan sinyal masukan sedangkan kurva yang tengah dan bawah menunjukkan hasil pemfilteran sinyal pembawa f_1 dan f_2 , berturut-turut. Berdasarkan gambar tersebut dapat dibuat sebuah kriteria sederhana untuk pendeteksian garis pemandu. Apabila kedua amplitudo sinyal pembawa f_1 dan f_2 berada di atas nilai ambang tertentu (Th_1 dan Th_2) secara serentak dan hal ini terjadi berturut-turut dalam selang waktu tertentu, berarti sensor mendeteksi garis pemandu.



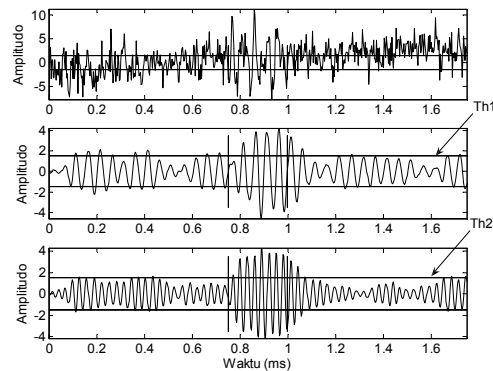
Gambar 4 Hasil pemfilteran sinyal yang bersih

Pada kondisi awal ($t=0$ pada Gambar 4) filter membutuhkan waktu sekitar $100 \mu s$ untuk menghasilkan respon yang sesuai dengan sinyal masukan. Hal yang sama juga terjadi pada saat sensor mendeteksi garis pemandu. Keterlambatan $100 \mu s$ ini setara dengan jarak $0,4 \text{ mm}$ untuk kecepatan robot sebesar 4 m/s , yaitu kurang dari setengah lebar garis 1 mm . Dengan demikian, tanggapan transien filter ini mencukupi untuk mendeteksi garis sebesar 1 mm .

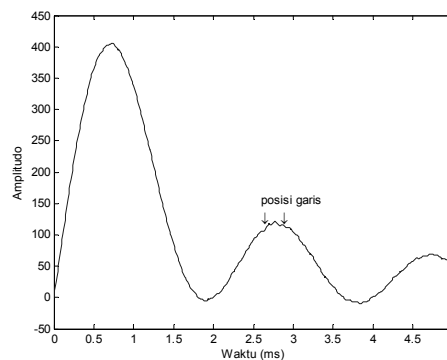
Unjuk kerja filter untuk mengolah sinyal yang terkontaminasi sinyal gangguan diilustrasikan dalam Gambar 5. Keluaran kedua filter menunjukkan pola yang mirip dengan pola dalam Gambar 4, yaitu ketika garis pemandu terdeteksi terjadi kenaikan amplitudo yang signifikan. Terlihat bahwa kenaikan amplitudo di atas ambang Th_1 dan Th_2 yang diakibatkan derau terjadi hanya dalam selang waktu yang relatif sempit. Dengan demikian, hal ini tidak menyebabkan kesalahan pendeteksian.

4) UNJUK KERJA SISTEM

Sistem diuji dengan simulasi pendeteksian lima ribu garis pemandu selebar 1 mm dengan jarak antar garis sekitar 20 mm . Hasil pengujian untuk sinyal yang relatif bersih, dengan SNR di atas 20 dB , menunjukkan bahwa sistem sensor mampu mendeteksi garis dengan sempurna. Sistem relatif kebal terhadap pengaruh interferensi 50 Hz meskipun level sinyal interferensi tersebut dinaikkan sehingga SNR turun mencapai -100 dB (Gambar 6). Hasil pendeteksian yang mendekati sempurna untuk kasus terburuk ini ditunjukkan dalam Tabel 2.



Gambar 5 Hasil pemfilteran sinyal terkontaminasi

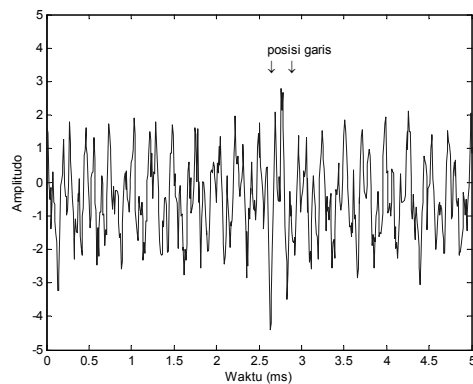


Gambar 6 Sinyal terinterferensi (SNR -100 dB)

TABEL II PENGARUH INTERFERENSI (SNR -100 dB)

No	Frekuensi Pembawa (Hz)		Hasil Pendeteksian		
	f_1	f_2	Valid	Kesalahan	
				Positif	Negatif
1	4000	10800	5000	1	0
2	6000	12800	5000	0	0
3	8000	14800	5000	0	0
4	10000	16800	5000	0	0
5	12000	18800	5000	0	0
6	14000	20800	5000	0	0
7	16000	22800	5000	0	0
8	18000	24800	5000	0	0
9	20000	26800	5000	0	0

Sistem relatif sensitif terhadap derau acak. Seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 7 dan 8, derau acak cenderung merusak bentuk sinusoisa sinyal pembawa. Selain itu, derau acak cenderung menghasilkan bentuk-bentuk palsu pendeteksian suatu garis terdeteksi sehingga derau ini cenderung menghasilkan kesalahan positif terutama untuk frekuensi pembawa yang rendah, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3 dan 4.



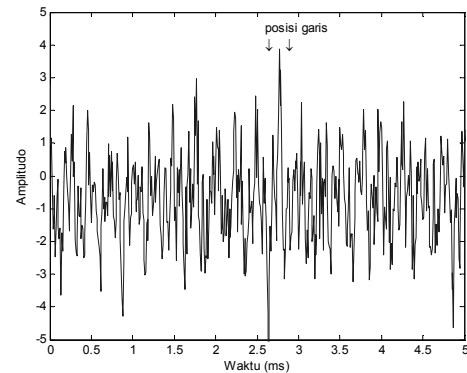
Gambar 7 Sinyal terkontaminasi derau (SNR 10 dB)

TABEL III PENGARUH DERAU ACAK (SNR 10 dB)

No	Frekuensi Pembawa (Hz)		Hasil Pendeteksian		
	f_1	f_2	Valid	Kesalahan	
				Positif	Negatif
1	4000	10800	4970	0	30
2	6000	12800	4999	0	1
3	8000	14800	5000	0	0
4	10000	16800	4999	0	1
5	12000	18800	5000	0	0
6	14000	20800	5000	0	0
7	16000	22800	5000	0	0
8	18000	24800	5000	0	0
9	20000	26800	5000	0	0

Kesalahan positif adalah kesalahan pendeteksian garis yang seharusnya tidak ada. Sebaliknya, kesalahan negatif ialah kegagalan pendeteksian garis yang seharusnya ada. Secara umum, kesalahan positif yang jauh lebih banyak terjadi menunjukkan bahwa derau lebih bersifat membangkitkan informasi palsu daripada merusak sinyal informasi itu sendiri. Derau semacam ini

mungkin dapat dikurangi atau bahkan dihilangkan dengan menggunakan suatu algoritma pendeteksian yang lebih cerdas, mengingat bahwa posisi garis-garis pemandu dalam perlombaan yang sesungguhnya telah diketahui, sehingga kesalahan positif pada posisi-posisi tertentu dapat diabaikan.



Gambar 8 Sinyal terkontaminasi derau (SNR 0 dB)

TABEL IV PENGARUH DERAU ACAK (SNR 0 dB)

No	Frekuensi Pembawa (Hz)		Hasil Pendeteksian		
	f_1	f_2	Valid	Kesalahan	
				Positif	Negatif
1	4000	10800	4826	108	174
2	6000	12800	4970	109	30
3	8000	14800	4976	43	24
4	10000	16800	4990	36	10
5	12000	18800	4987	13	13
6	14000	20800	4997	14	3
7	16000	22800	4991	6	9
8	18000	24800	4997	0	3
9	20000	26800	4999	2	1

Penggunaan frekuensi pembawa yang semakin tinggi cenderung membuat sistem lebih tahan terhadap derau karena dalam satu segmen selebar 1 mm jumlah gelombang sinyal pembawa semakin banyak. Jumlah gelombang yang semakin banyak tersebut memperkecil peluang rusaknya keseluruhan bentuk gelombang akibat derau karena secara umum derau hanya merusak sebagian (kecil) bentuk gelombang.

Meskipun penggunaan frekuensi pembawa yang tinggi menguntungkan ditinjau dari sisi ketahanan terhadap derau, kesulitan pengimplementasian sistem penting untuk dipertimbangkan. Di antara permasalahan teknis yang harus dipertimbangkan ialah keterbatasan frekuensi pencuplikan ADC dan kecepatan eksekusi sistem pengolahan data. Sebagai contoh, pemilihan frekuensi pembawa 20 kHz dan 26,8 kHz memerlukan frekuensi percuplikan sekitar 300 kHz. Lebih lanjut, dalam waktu kurang dari 0,33 μ s seluruh proses pemfilteran digital dan pendeteksian garis harus sudah selesai. Proses ini membutuhkan suatu sistem pengolahan data (seperti mikrokontroler atau pemroses sinyal digital) kecepatan tinggi.

IV. KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem sensor dengan frekuensi pembawa di atas 18 kHz sangat prospektif untuk diaplikasikan pada robot-robot otomatis pada KRI, terutama untuk mengatasi gangguan dari lampu sorot kamera televisi.

V. SARAN

Saran-saran dalam pengimplementasian maupun peningkatan unjuk kerja sistem dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

- Hasil-hasil simulasi perlu divalidasi dengan percobaan pengimplementasian sistem dalam sistem robot yang sesungguhnya.
- Kedua filter digital serta sistem pengambilan keputusan dapat diimplementasikan ke dalam sistem mikrokontroler.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Asia-Pacific Robot Contest. 2005. Theme and Rules. On-line: <http://www.kri.or.id>
- [2] Barshan, B., B. Ayrulu, & S.W. Utete. 2000. Neural network-based target differentiation using sonar for robotics applications. IEEE Transactions on Robotics & Automation, Vol. 16, No. 4: 435-442.
- [3] Beck, R., A.G. Dempster, & I. Kale. 2001. Finite-precision Goertzel filters used for signal tone detection. IEEE Transactions on Circuits & Systems II: Analog & Digital Signal Processing, Vol. 48, No. 7: 691-700.
- [4] Daponte, P., D. Grimaldi, & L. Michaeli. 2000. Neural network and DSP based decoder for DTMF signals. IEE Proceedings - Science, Measurement & Technology, Vol. 147, No. 1: 34-40.
- [5] Das, A.K., R. Fierro, V. Kumar, J.P. Ostrowski, J. Spletzer, & C.J. Taylor. 2002. A vision-based formation control framework. IEEE Transactions on Robotics & Automation, Vol. 18, No. 5: 813- 825.
- [6] Fredslund, J., & M.J. Mataric. 2002. A general algorithm for robot formations using local sensing & minimal communication. IEEE Transactions on Robotics & Automation, Vol. 18, No. 5: 837- 846.
- [7] Jensfelt, P., & H.I. Christensen. 2001. Pose tracking using laser scanning & minimalistic environmental models. IEEE Transactions on Robotics & Automation, Vol. 17, No. 2: 138-147.
- [8] McKerrow, P.J., Shao-Min Zhu, & S. New. 2001. Simulating ultrasonic sensing with the lattice gas model. IEEE Transactions on Robotics & Automation, Vol. 17, No. 2: 202-208.
- [9] Saripalli, S., J.F. Montgomery, & G.S. Sukhatme. 2003. Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle. IEEE Transactions on Robotics & Automation, Vol. 19, No. 3: 371-380.
- [10] Subramaniam ,R., R. Sharadh, & K. M. M. Prabhu. 2003. Performance of dual tone multi-frequency signal decoding algorithm using the sub-band non-uniform discrete Fourier transform on the ADSP-2192 processor. Microprocessors & Microsystems, Vol. 27, No. 10: 501-510.
- [11] Wang, J.S. & C.S.G. Lee. 2003. Self-adaptive recurrent neuro-fuzzy control of an autonomous underwater vehicle. IEEE Transactions on Robotics & Automation, Vol. 19, No. 2: 283-295.
- [12] Xiao, Y., R.K. Ward, L. Ma, & A. Ikuta. 2005. A new LMS-based Fourier analyzer in the presence of frequency mismatch and applications. IEEE Transactions on Circuits & Systems I: Regular Papers, Vol. 52, No. 1: 230-245.