

DESAIN SISTEM KONTROL UMPAN BALIK PADA LINTASAN TRAKTOR TANPA OPERATOR

(DESIGN OF FEEDBACK CONTROL SYSTEM
FOR AN AUTONOMOUS TRACTOR TRAJECTORY)

Lilik Sutiarmo¹⁾, T. Takigawa²⁾

ABSTRACT

In the term of precision farming system, this research was carried out in order to develop a trajectory path control method for the autonomous tractor when approaching a target. Firstly, open loop control was considered to design a trajectory control algorithm directly, definitely and simply structure. A proposed trajectory control algorithm called parallel parking theory was developed as non-linear state equation within non-holonomic constraint. To stabilize non-linear controller, the algorithm was derived using the state feedback linearization technique. The vehicle posture can be expressed into position, direction angle and steering angle. In a front-wheel steering vehicle, two controlling inputs, running speed and steering angle. Due to the running speed is difficult to control accurately, thus only the steering angle was controlled. In order to achieve the research objective, research work was carried out to compare the performance developed control algorithm between feedback and open-loop control system.

A twenty-nine Ps computer-controlled tractor with four-wheel steering and four-wheel drive was used in this research experiment. For local based positioning method, fan beam laser sensor, fiber optic gyro sensor and incremental type rotary encoder were installed properly on the vehicle. The experimental results showed that after modifying of the developed algorithm into a feedback control form by correcting vehicle direction angle and lateral moving distance had improved its accuracy varied up to about 95%.

Keywords: non-linear control, non-holonomic, trajectory control, autonomous tractor

PENDAHULUAN

Dewasa ini, dengan didukung oleh teknologi komputer yang mengalami kemajuan pesat baik perangkat keras maupun lunak, perkembangan alat dan mesin pertanian telah mencapai aras penggunaan kontrol otomatis pada sebagian atau seluruh fungsi pengoperasian mesin dan peralatan tersebut. Tujuan penggunaan kontrol otomatis pada mesin dan peralatan pertanian secara umum adalah untuk mengurangi beban kerja operator, meningkatkan akurasi kerja, dan mempermudah pengoperasian, serta aspek keamanan bagi operator.

Permasalahan yang timbul dalam perancangan kontrol otomatis berbasis komputer untuk mesin dan peralatan pertanian adalah keakuratan kerjanya sangat dipengaruhi kondisi lingkungan baik *external* maupun

internal. Gangguan-gangguan tersebut mempunyai dampak pada penurunan tingkat akurasi sistem kontrol yang dirancang.

Tujuan dari studi ini adalah merancang sistem kontrol umpan balik (*feedback control system*) pada kontrol lintasan traktor tanpa operator yang dirancang untuk mendekati suatu obyek guna mengurangi pengaruh gangguan dan sekaligus meningkatkan kinerja sistem.

DASAR TEORI

Sistem kontrol adalah proses pengaturan/pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (variabel, parameter) sehingga berada pada suatu harga atau dalam suatu kisaran tertentu (Pakpahan, 1994). Dari segi peralatan, sistem kontrol terdiri dari berbagai susunan komponen fisis yang digunakan untuk mengarahkan aliran energi ke suatu mesin atau proses agar dapat menghasilkan prestasi yang diinginkan. Tujuan dari sistem kontrol adalah untuk mendapatkan optimisasi pada fungsi-fungsi pengendalian, yaitu; (a) pengukuran, (b) perbandingan, (c) perhitungan, (d) koreksi. Secara umum sistem kontrol dapat dikelompokkan sebagai berikut;

1. Dengan operator (manual) dan otomatis
2. Jaringan tertutup (*closed-loop*) dan jaringan terbuka (*open-loop*)
3. Kontinyu (*analog*) dan diskontinyu (*digital*)
4. Servo dan regulator
5. Sumber penggerak; elektrik, pneumatis, hidrolik dan mekanis

Pengontrolan secara manual adalah pengontrolan yang dilakukan oleh manusia yang bertindak sebagai operator, sedangkan pengontrolan secara otomatis dilakukan oleh mesin-mesin/peralatan yang bekerja secara otomatis dan operasinya di bawah pengawasan manusia. Kemudian, sistem kontrol pada jaringan terbuka diindikasikan dengan tidak ada pengaruh/efek antara besaran keluaran dengan masukan, sehingga variabel yang dikontrol tidak dapat dibandingkan terhadap harga yang diinginkan. Sedangkan sistem kontrol pada jaringan tertutup, besaran keluaran memberikan efek terhadap besaran masukan, sehingga besaran yang dikontrol dapat dibandingkan dengan terhadap harga yang diinginkan melalui alat pencatat. Selanjutnya, perbedaan harga yang

¹⁾ Jurusan Teknik Pertanian, Fak. Teknologi Pertanian UGM – Bulaksumur Yogja, 55281

²⁾ Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba, Jepang

terjadi antara besaran yang dikontrol dan penunjukkan alat pencatat digunakan sebagai koreksi yang pada gilirannya akan merupakan sasaran pengontrolan.

Dalam sistem tertutup, peranan operator dimaksudkan sebagai suatu cara untuk mengembalikan (menunjukkan) hasil keluaran (umpan balik - *feedback*) kepada operator itu sendiri agar dapat memberikan perbandingan terhadap harga yang diinginkan. Pengontrolan aktual bergantung pada besarnya penyimpangan (*error*) dari pengukuran dan kecepatan operator untuk melakukan koreksi. Karena di dalam sistem ini terjadi proses pengembalian keluaran ke masukan, maka sistem tertutup ini sering juga disebut sistem kontrol umpan balik (*feedback control system*).

Dorf, et al. (1995) menyatakan bahwa sistem kontrol jaringan terbuka adalah sistem tanpa umpan balik, sebaliknya kontrol dengan jaringan tertutup menggunakan suatu tambahan pengukuran dari keluaran aktual untuk membandingkan respon keluaran yang diinginkan. Besaran keluaran yang disebut sinyal umpan balik digunakan untuk meminimumkan kesalahan kontrol. Secara teoritis, sistem kontrol umpan balik adalah suatu sistem kontrol yang memiliki tendensi untuk mempertahankan hubungan yang telah diatur dari satu variabel sistem dan lainnya dengan cara membandingkan fungsi-fungsi dari variabel-variabel tersebut. Sistem kontrol umpan balik diintroduksi untuk mengatasi keterbatasan-keterbatasan yang ada pada sistem kontrol jaringan terbuka. Sistem kontrol terbuka telah diaplikasikan pada perancangan kontrol lintasan traktor tanpa operator (Sutiarso, et al., 2001).

Sistem kontrol umpan balik sederhana telah digunakan untuk kontrol pengendalian pada kebanyakan mesin-mesin industri. Kendaraan dengan pemandu otomatis dengan dilengkapi perlengkapan kontrol umpan balik (Suzuki, et al., 1986) dengan mengendalikan kesalahan pada variabel sudut orientasi θ_c dan jarak lateral gerakan kendaraan y_c , dalam bentuk $k_1(\theta_c + k_2 y_c)$, dimana k_1 dan k_2 adalah koefisien umpan balik (*feedback gains*).

Dalam studi ini, tujuan penggunaan sistem kontrol umpan balik adalah untuk meminimumkan kesalahan kontrol dengan berdasarkan sinyal umpan balik dari variabel sudut orientasi dan jarak lateral gerakan traktor. Secara skematis, rancangan dari sistem kontrol umpan balik yang digunakan pada traktor dapat dilihat pada Gambar 1.

Pada Gamb. 1, Δy adalah besarnya deviasi antara jarak lateral kendaraan dengan jarak nominal lintasan yang diinginkan, dan $\Delta\theta$ adalah deviasi besarnya sudut orientasi kendaraan yang terjadi. y_i dan θ_i merupakan besaran jarak dan sudut orientasi teoritis yang diinginkan, y_m dan θ_m adalah nilai variabel jarak lateral dan sudut orientasi berdasarkan pengukuran di lapangan.

Untuk menghitung besarnya koefisien umpan balik (k_1, k_2) digunakan metode "pole-placement". Sedangkan untuk menentukan kondisi fungsi yang diperlukan pada penggunaan metode ini, suatu proses linier didiskripsikan

sebagai berikut.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

Dengan mengacu pada persamaan-persamaan tiga variabel postur kendaraan dalam 2-dimensi koordinat XY (Sutiarso, et al., 2000), yaitu;

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = V \cos \theta \quad (2)$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = V \sin \theta \quad (3)$$

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = r = \frac{V \tan \delta}{l} \quad (4)$$

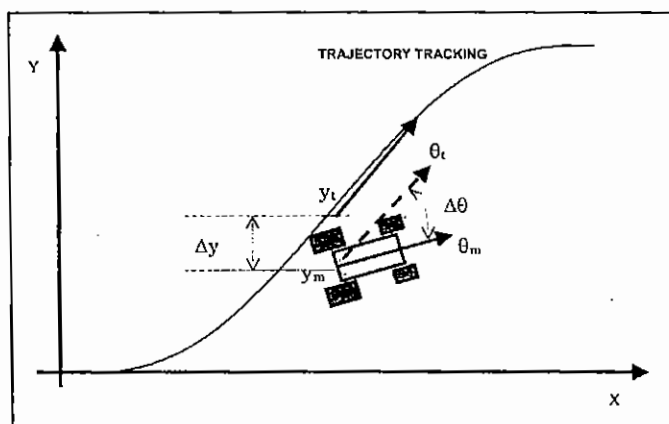


Fig. 1. Introduction of feedback control system

Dimana δ dan V adalah besarnya sudut steering roda depan traktor dan kecepatan jalan. Dari Persamaan (2) dan (3), dapat ditulis persamaan diferensial y terhadap x , yaitu;

$$y' = \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt} \cdot \frac{dt}{dx} = \frac{V \sin \theta}{l} \cdot \frac{1}{V \cos \theta} = \tan \theta \quad (5)$$

Dari Persamaan (5), kondisi yang diperlukan untuk penentuan koefisien umpan balik (k_1, k_2) dapat diturunkan menjadi,

$$\Delta y' = \frac{\partial(\tan \theta)}{\partial \theta} \cdot \Delta \theta = \frac{1}{\cos^2 \theta} \cdot \Delta \theta \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta' &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\tan \delta}{l \cos^3 \theta} \right) \cdot \Delta \theta + \frac{\partial}{\partial \delta} \left(\frac{\tan \delta}{l \cos^3 \theta} \right) \cdot \Delta \delta \\ &= 3 \frac{\tan \delta \sin \theta}{l \cos^4 \theta} \cdot \Delta \theta + \frac{1}{l \cos^3 \theta \cos^2 \delta} \cdot \Delta \delta \end{aligned} \quad (7)$$

Persamaan (6) dan (7) dapat disederhanakan menjadi,

$$\Delta y' = A \cdot \Delta \theta \quad (8)$$

$$\Delta \theta' = B \cdot \Delta \theta + C \cdot \Delta \delta \quad (9)$$

Jika, $\Delta y = x_1$; $\Delta \theta = x_2$; dan $\Delta \delta = u$, maka Pers. (8) dan (9) dapat ditulis dalam bentuk persamaan kondisi kontrol,

$$x_1' = Ax_2 \quad (10)$$

$$x_2' = Bx_2 + Cu \quad (11)$$

kemudian,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & A \\ 0 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C \end{bmatrix} u \quad (12)$$

Persamaan (12) dapat disederhanakan menjadi,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & A \\ 0 & B \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ C \end{bmatrix} u \quad (13)$$

Untuk menentukan besarnya koefisien kontrol umpan balik digunakan metode "pole-placement", dengan melalui beberapa tahap perhitungan, yaitu;

1. Persamaan (13) disederhanakan bentuknya menjadi;

$$\dot{x} = Dx + eu \text{ dimana, } D = \begin{bmatrix} 0 & A \\ 0 & B \end{bmatrix} \text{ dan } e = \begin{bmatrix} 0 \\ C \end{bmatrix}$$

2. Menghitung $|sI - D|$, dimana $sI = \begin{bmatrix} s & 0 \\ 0 & s \end{bmatrix}$,

sehingga $|sI - D| = s^2 - Bs$, koefisien dari persamaan ini adalah $a_1 = 0$, $a_2 = -B$, dan $a_3 = 1$

3. Menghitung T^{-1} , dimana $T = [e \quad De] \begin{bmatrix} -B & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$,

$$\text{maka harga } T^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{AC} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix}$$

4. Menentukan posisi-posisi "pole" secara trial-error, Apabila didapat posisi-posisi pole adalah; $p_1 = -1$ dan $p_2 = -3$, kemudian persamaan ditulis sebagai berikut;

$$(s+1)(s+3) = s^2 + 4s + 3, \quad \text{koefisien}$$

persamaannya; $d_1 = 3$, $d_2 = 4$ dan $d_3 = 1$

5. Menghitung koefisien kontrol umpan balik dengan persamaan

$$f = [d_1 - a_1 \quad d_2 - a_2] T^{-1}, \text{ menjadi}$$

$$f = [3 \quad 4+B] \begin{bmatrix} \frac{1}{AC} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix}$$

$$f = \left[\frac{3}{AC} \quad \frac{4+B}{C} \right], \text{ maka didapat hasil}$$

$$k_1 = \frac{3}{AC} \text{ dan } k_2 = \frac{4+B}{C}$$

Dengan mengacu pada persamaan kontrol lintasan yang telah dirancang dengan jaringan terbuka (Sutiarso, et al., 2001),

$$\tan \delta = l \cos^3 \theta \left(\frac{\pi^2 y_f \cos \left(\frac{\pi x}{x_f} \right)}{2x_f^2} \right) \quad (14)$$

maka setelah dimodifikasi ke dalam jaringan tertutup menjadi,

$$\delta_{feedback} = \delta_{openloop} + k_1 \Delta \theta + k_2 \Delta y \quad (15)$$

dimana x_f dan y_f adalah koordinat posisi x dan y pada titik target.

METHODOLOGI PENELITIAN

Mesin dan peralatan yang digunakan

Traktor yang dikontrol komputer dengan daya 29 PS digunakan untuk mengevaluasi sistem kontrol yang dikembangkan. Komunikasi data antara unit kontrol traktor dan komputer menggunakan interface tipe RS232C dengan kecepatan 19.600 bps pada data 8 bit. Sistem navigasi lokal untuk mengetahui posisi dan orientasi dari obyek sasaran, traktor dilengkapi dengan laser sensor. Kemudian, obyeknya dipasang reflektor untuk menangkap dan mengirim kembali signal dari sensor tersebut.

Metode dead reckoning digunakan untuk mengetahui perbedaan nilai aktual dengan besaran yang diinginkan. Metode ini akan mengkoreksi besarnya penyimpangan (deviasi) dari nilai y (posisi traktor terhadap sumbu y) dan sudut orientasi traktor θ . Dua jenis sensor dipergunakan untuk mengukur postur traktor pada saat bergerak per satuan waktu (real time), yaitu gyro sensor yang dipergunakan untuk menentukan besarnya θ dan sepasang rotary encoder yang dipasang pada roda belakang kiri

kanan, mengetahui nilai y dengan prinsip menghitung jumlah putaran roda traktor.

Pengumpulan data

Untuk mengetahui perbedaan pengaruh penggunaan sistem kontrol umpan balik pada tingkat akurasi kontrol, maka ada 4 (empat) jenis data lintasan yang diperbandingkan, yaitu (a) data hasil simulasi melalui komputer, (b) data lintasan dengan jaringan terbuka, (c) data lintasan dengan kontrol umpan balik dan (d) data lintasan berdasarkan pengukuran langsung di lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari uji lapangan dengan menggunakan traktor tanpa operator yang dikontrol kendalanya secara kontrol umpan balik (*feedback control system*) dapat dilihat pada **Gambar 2** dan **Gambar 3**. Pada **Gamb. 2** dapat dilihat bahwa perbedaan nyata antara penggunaan sistem kontrol jaringan terbuka tanpa adanya koreksi kesalahan parameter-parameter kontrol, sehingga terjadi deviasi antara nilai aktual dengan nilai yang diinginkan (simulasi) sebesar 33 cm (16%) pada akhir titik target. Pada perlakuan dengan menggunakan kontrol umpan balik sederhana, hanya satu parameter yang dikoreksi yaitu sudut orientasi traktor, kinerja sistem meningkat, besarnya kesalahan dapat diturunkan sampai mencapai 10 cm (2%).

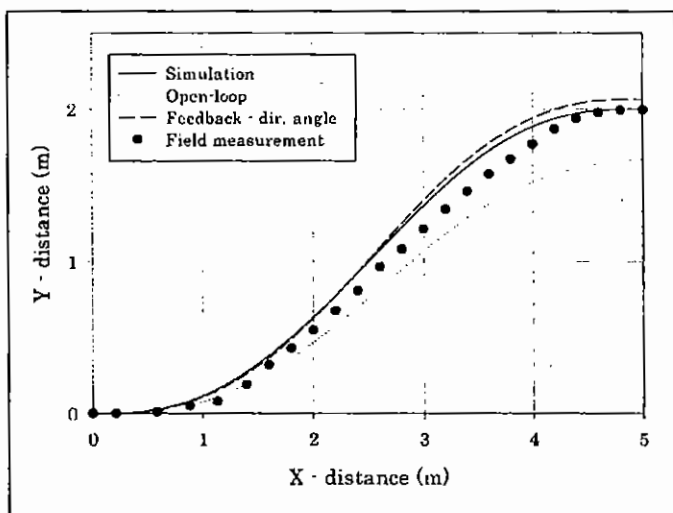


Fig. 2. Improvement of tracking ability by simple feedback control

Pada **Gamb.3**, ada dua parameter yang dikoreksi kesalahannya, yaitu jarak lateral gerakan traktor y dan sudut orientasi θ (*pole assignment based feedback control*) dengan menambah koefisien pada setiap parameter tersebut (k_1 dan k_2). Pada perlakuan tersebut dapat dilihat bahwa tidak ada perbedaan nyata antara lintasan yang diharapkan (simulasi) dengan data lintasan dengan menggunakan kontrol umpan balik. Besarnya kesalahan lintasan pada titik akhir target hanya sekitar 1 cm (0.5%). Perbedaan yang masih terjadi dengan pengukuran langsung di lapangan lebih disebabkan pada

faktor-faktor di luar sistem.

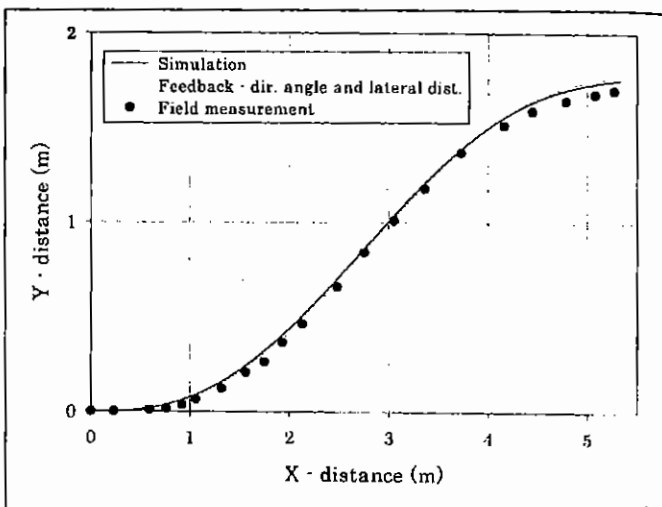


Fig. 3. Improvement of tracking ability by pole assignment based feedback control

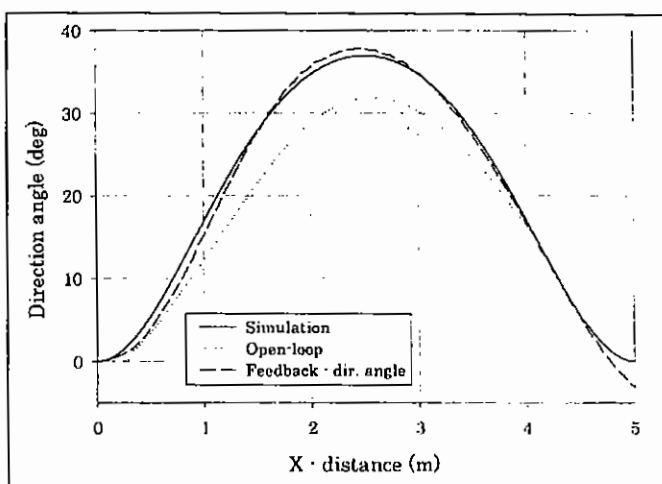


Fig. 4. Direction angle performance by simple feedback control

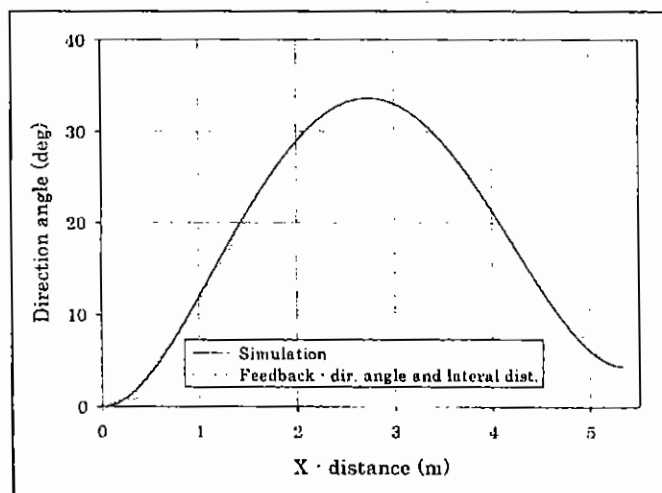


Fig. 5. Direction angle performance by pole assignment based feedback control

Pada Gambar 4 dan 5 dapat ditunjukkan bahwa tingkat akurasi dari sudut orientasi θ_f traktor pada kondisi akhir (*final position*) dengan menggunakan metode "*pole assignment based feedback control*" dapat mencapai 0.45° . Sedangkan, dengan menggunakan metode sederhana, yaitu "*direction angle based feedback control*", besarnya kesalahan sudut orientasi traktor di titik akhir masih sebesar 4.52° .

Tingkat akurasi pada sudut kendali (*steering angle*) traktor di posisi akhir δ_f dapat ditingkatkan sampai mencapai 0.56° dengan menggunakan metode "*pole assignment based feedback control*", seperti ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.

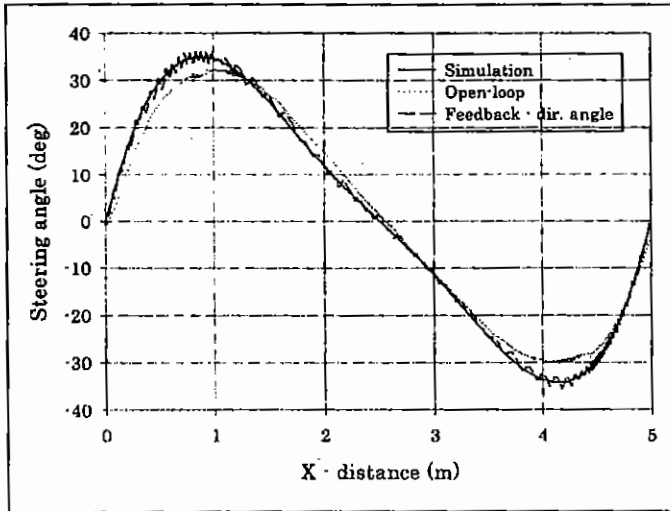


Fig. 6. Steering angle performance by simple feedback control

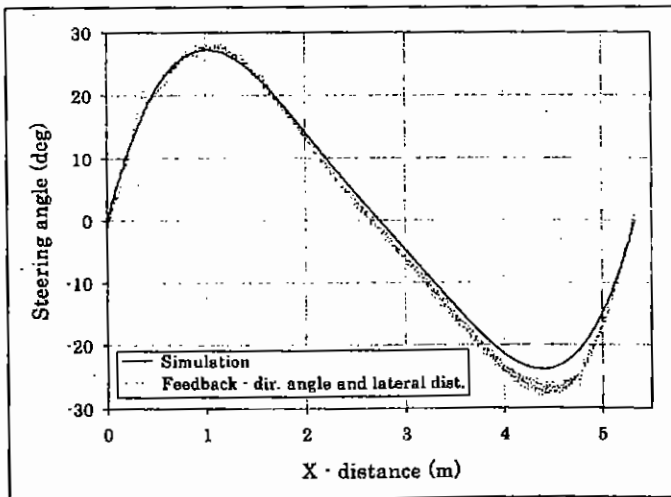


Fig. 7. Steering angle performance by pole assignment based feedback control

KESIMPULAN

Aplikasi sistem kontrol umpan balik pada sistem kontrol lintasan traktor tanpa operator dengan menggunakan metode pool placement dapat meningkatkan kinerja sistem, mengurangi besarnya penyimpangan lintasan yang terjadi di lapangan. Tingkat akurasi sistem kontrol lintasan gerakan traktor meningkat sampai mencapai di atas 90%, pada saat traktor mendekati obyek (target).

DAFTAR PUSTAKA

- Dorf, R.C. and Bishop, R.H., 1995, *Modern Control System*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., New York.
- Pakpahan, S., 1994, *Kontrol Otomatik - Teori dan Penerapan*, Edisi - 2, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Sutiarso, L., Takigawa, T., Koike, M., Hasegawa, H., 2000, *Trajectory Control for Agricultural Autonomous Vehicles (Part 3 - a Field experiment of the designed trajectory control)*, Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 62(6); 125-135, Japan.
- Sutiarso, L., Takigawa, T. dan Koike, M., 2001, *Pengembangan Sistem Kontrol Navigasi untuk Traktor Pertanian Tanpa Operator*, Prosiding Seminar Nasional Inovasi Alat dan Mesin Pertanian untuk Agribisnis, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Dep. Pertanian dan Perhimpunan Teknik Pertanian, Buku I:153-160, Jakarta.
- Suzuki, T. and Hosoi, K., 1986, *Spot Mark Guided Autonomous Vehicle*, Komatsu Technical Reports, 32(2); 82-91, Japan