

TRAYECTORIA DE UN TRACTOR CON GUIADO AUTOMÁTICO

TRAJECTORY OF A TRACTOR WITH AUTOMATIC GUIDANCE

José A. Yam-Tzec; Eugenio Romantchik-Kriuchkova*; Álvaro Morelos-Moreno;
Luciano Pérez-Sobrevilla; Gilberto J. López-Canteñs

Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua,
Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5. Chapingo,
Estado de México. C.P. 56230, MÉXICO.
Correo-e: eugenior@hotmail.com (*Autor para correspondencia)

RESUMEN

Los tractores agrícolas guiados automáticamente son tractores convencionales que se encuentran equipados con sistemas de geo-posicionamiento, sensores y actuadores que permiten programar su trayectoria. El sistema de dirección automática, soluciona la necesidad de contar con un conductor que tenga la capacidad de realizar trayectorias exactas y otras necesidades (como realizar labores agrícolas durante la noche). Con el objetivo de evaluar el error lateral se trazó la trayectoria ideal del tractor, considerándolo como una masa puntual, para lo cual se utilizó un sistema de guiado automático EZ-Guide 250 de Trimble® instalado en la unidad Massey Ferguson 592T. Como resultado se obtuvo la trayectoria ideal, utilizando ecuaciones vectoriales; además se observó que en línea recta, cuando la velocidad aumentó de 5 a 9 km·h⁻¹, las medias del error de la trayectoria aumentaron de 2.0 a 7.0 cm. Para el caso de pivote central, teniendo el mismo incremento de velocidad, el comportamiento de las medias fue de 6.1 hasta 7.8 cm, con diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0.05$).

PALABRAS CLAVE: Auto guiado, error de trayectoria, corrección diferencial, autopiloto.

ABSTRACT

Automatically-guided farm tractors are conventional tractors equipped with geo-positioning systems, sensors and actuators that allow programing their trajectory. Automatic steering systems eliminate the need of having a driver as they are able to make accurate trajectories and also allow carrying out farm work during the night or when there is low visibility. In order to evaluate lateral error, the ideal trajectory of a tractor, regarding it as a point mass, was plotted. For this purpose, a Trimble® EZ-Guide 250 automatic guidance system was installed on a Massey Ferguson 592T tractor. Using vector equations, the ideal trajectory was obtained; it was also observed that in straight line travel, when the speed was increased from 5 to 9 km·h⁻¹, the mean trajectory error increased from 2.0 to 7.0 cm. In the case of center pivot travel, with the same increase in speed, the mean error increased from 6.1 to 7.8 cm, with significant differences among treatments ($P \leq 0.05$).

KEYWORDS: Automatic guidance, trajectory error, differential correction, autopilot.



Recibido: 7 de mayo de 2014
Aceptado: 12 de noviembre de 2014
doi: 10.5154/r.inagbi.2014.05.004

Muchas de las actividades agrícolas realizadas con tractor requieren precisión, estas han ido mejorando con el avance tecnológico, logrando ahorros económicos en diversos aspectos. El sistema de guiado se ha integrado como herramienta importante en Norteamérica, debido a la precisión requerida en las actividades agrícolas (Reid, Zhang, Noguchi & Dickson, 2000). En Europa, el nivel de adopción de los sistemas de guiado ha ido aumentando, la principal ventaja es la eficiencia en la mano de obra, además de la facilidad para acoplarlo en los tractores. Otra ventaja, es que se pueden incrementar las velocidades de operación, así como evitar traslapes que originen gastos (Li, Imou, Wakabayashi, & Yokoyama, 2009). Buick y White (1999) mencionan que el uso de sistemas de guiado incrementa la productividad en los cultivos, ya que se puede trabajar durante las 24 horas en tiempos críticos, por ejemplo: cuando se tienen que realizar labores de siembra o de trasplante, se evita la fatiga del conductor. El sistema de dirección automática soluciona la necesidad de contar con un conductor con experiencia en realizar trayectorias exactas y otras necesidades, como realizar labores agrícolas durante la noche o cuando existe poca visibilidad producto de contaminación en el ambiente o neblina (Kise, Zhang & Rovira, 2005; Pedersen, Fountas, Have & Blackmore, 2005).

Los beneficios que se pueden lograr con la dirección automática son: incrementos en la productividad, ahorros en insumos y seguridad en las actividades (Reid et al., 2000), además de reducir el número de horas de funcionamiento del tractor al realizar labores precisas, y la emisión de residuos tóxicos producto de la combustión (Pedersen et al., 2005).

Los tractores guiados automáticamente, son equipos convencionales que se encuentran equipados con sistemas de posicionamiento geográfico (GPS), sensores y actuadores que permiten programar su trayectoria. El autoguiado es ampliamente usado en el sector naval, aeronáutico y en el transporte, sin embargo, aún no se generaliza su uso en el sector agrícola, pese a que las principales demandas en éste se deben a la necesidad de operar durante largos y monótonos periodos de tiempo (Li et al., 2009). Los GPS aplicados al sistema de dirección ubican en tiempo real las coordenadas exactas de un cuerpo rígido, y con el uso de sistemas de control, dirigen al tractor sobre la trayectoria planeada (Derrick & Bevly, 2009; Tillett, 1991). Sin embargo, a pesar de las ventajas de estos sistemas, se depende en gran medida de los sistemas de geo-referencia, su constelación y de la posición de los satélites, por tanto, es importante contar con correcciones diferenciales (Li et al., 2009; Gan Mor, Clark & Upchurch, 2007).

La determinación de respuesta dinámica del tractor es esencial para lograr una trayectoria precisa (Feng, He & Zhang, 2005). Las características de manejo del tractor,

Many farm activities carried out with a tractor require precision, which has improved with technological progress, achieving cost savings in several areas. The guidance system has become an important tool in North American farming because of the precise positioning required in agricultural activities (Reid, Zhang, Noguchi, & Dickson, 2000). In Europe, guidance systems are being increasingly adopted. The main advantages are improved labor efficiency and the ease with which they can be attached to a tractor. Another advantage is that they can increase tractor operating speeds and avoid overlaps that create additional costs (Li, Imou, Wakabayashi, & Yokoyama, 2009). Buick and White (1999) note that the use of guidance systems increases farm efficiency, since work can be done 24 hours a day in critical times, for example when sowing or transplanting work has to be carried out, thus avoiding driver fatigue. An automatic steering system eliminates the need of having a driver with experience in making accurate trajectories and also allows carrying out farm work during the night or when there is low visibility as a result of environmental pollution or fog (Kise, Zhang & Rovira, 2005; Pedersen, Fountas, Have & Blackmore, 2005).

The benefits that can be achieved with automatic steering are increases in productivity, savings in inputs and improvements in work safety (Reid et al., 2000), as well as reducing both the number of tractor operating hours by performing precise tasks and the emission of toxic residues resulting from combustion (Pedersen et al., 2005).

Automatically-guided tractors are conventional units equipped with geographic positioning systems (GPS), sensors and actuators that allow programming their trajectory. Autoguiding is widely used in the shipping, aeronautical and transport sectors; however, it is still not widely used in agriculture, where it is mainly in demand due to the need to operate for long and monotonous periods of time (Li et al., 2009). The GPS applied to the steering system locates in real time the exact coordinates of a rigid body, and with the use of control systems directs the tractor on the planned path (Derrick & Bevly, 2009; Tillett, 1991). However, despite the advantages of these systems, they largely depend on geo-referencing systems, their satellite constellation and the position of the satellites, making it important to have differential corrections (Li et al., 2009; Gan Mor, Clark & Upchurch, 2007).

Determination of the tractor's dynamic response is essential to achieve an accurate trajectory (Feng, He & Zhang, 2005). The tractor's handling characteristics refer to its response to environmental disturbances. There are two basic issues in vehicle handling: one is direction control and the other is the ability to stabilize this direction. Some disadvantages of auto-steering systems are due to the disruption of signals by geographical conditions, sudden movements and landslides, as well as the speed of the tractor itself. The objectives of this study are to obtain lat-

se refieren a su respuesta a perturbaciones del ambiente. Hay dos cuestiones básicas en el manejo de vehículos: una es el control de dirección y la otra es la habilidad para estabilizar esa dirección. Algunas desventajas de los sistemas de dirección automática se deben a la perturbación de señales por condiciones geográficas, de bruscos movimientos y deslizamientos así como de la velocidad propia del tractor. Los objetivos del presente trabajo son obtener valores de error lateral de la trayectoria para tres velocidades del tractor MF 592T, con el sistema de guiado semiautomático EZ Guide 250 instalado sobre la dirección.

MATERIALES Y MÉTODOS

Pruebas en campo

Se realizó el presente estudio con un tractor Massey Ferguson 592T con sistema de autoguiado EZ-Guide 250 de Trimble® y receptor AgGPS 252 adaptado con señal de corrección Omnistar XP®. El sistema de guiado automático EZ-Guide 250, consta de una pantalla, antena, motor eléctrico y controlador T2 (Figura 1).

El diseño empleado para el análisis de los datos, fue un arreglo factorial 3 x 2 donde los factores fueron: velocidad ($V1 = 5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $V2 = 7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ y $V3 = 9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), trayectoria realizada ($T1 =$ trayectoria lineal y $T2 =$ trayectoria en pivote central), se trabajaron seis tratamientos con tres repeticiones, los cuales se analizaron estadísticamente, realizando pruebas de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se instaló el sistema de guiado en el tractor, se calibró y realizaron pruebas preliminares.

Se trazó una línea definida AB con ayuda del sistema de corrección y se midió el error de la trayectoria seguida respecto al centro de gravedad, mismo que se configuró en el sistema de medición. Por medio de la interfaz con el usuario se configuró la trayectoria a seguir, el ancho del implemento y las características del servomotor que acciona al volante. Además de controlar errores máximos y la velocidad de respuesta del motor eléctrico, el medio de control reguló las funciones del sistema de guiado, tomó la información de la posición y corrigió la dirección del conjunto agrícola.

Las pruebas del sistema se realizaron en el campo experimental “Las Texas” del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA), en la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), ubicado en las coordenadas $19^\circ 49' \text{ LN}$ y $98^\circ 89' \text{ LO}$ y 2,250 m de altitud; a partir del día 17 de noviembre de 2011 a las 12:50 h, con media de seis satélites, y tiempo de corrección de 2 s.

Trazo teórico de la trayectoria ideal

La parte lineal se compone de dos parámetros básicos:

$$x = d \cos \alpha \quad (1)$$

$$y = d \sin \alpha \quad (2)$$

eral trajectory error values for three speeds of a MF 592T tractor, with an EZ-Guide 250 semi-automatic guidance system installed on the steering.

MATERIALS AND METHODS

Field tests

The present study was performed with a Massey Ferguson 592T tractor with a Trimble® EZ-Guide 250 automatic guidance system and an AgGPS 252 receiver adapted with an Omnistar XP® correction signal. The EZ-Guide 250 automatic guidance system consists of a display, antenna, electric motor and a T2 compensator controller (Figure 1).



FIGURA 1. Elementos del sistema de guiado automático.
FIGURE 1. Elements of automatic guidance system.

The design used for the data analysis was a 3 x 2 factorial arrangement where the factors were: speed ($V1 = 5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $V2 = 7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ and $V3 = 9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) and path traveled ($T1 =$ linear trajectory and $T2 =$ trajectory on a center pivot). Six treatments with three replicates were used and statistically analyzed with Tukey's test ($\alpha = 0.05$). The guidance system was installed in the tractor, calibrated and preliminary tests were conducted.

A defined AB line was plotted using the correction system and the error of the trajectory followed was measured with respect to the center of gravity, which was configured in the measurement system. Through the user interface, the trajectory to follow, the width of the implement and the characteristics of the servomotor which operates the steering wheel. As well as controlling maximum errors and the response speed of the electric motor, the controller regulated the functions of the guidance system, took the position information and corrected the direction of the agricultural unit.

System tests were conducted at the Agricultural Mechanical Engineering Department's “Las Texas” experimental field at the Universidad Autónoma Chapingo (UACH), located at coordinates $19^\circ 49' \text{ NL}$ and $98^\circ 89' \text{ WL}$, at 2,250 masl. Testing began at 12:50 p.m. on Nov. 17, 2011, with an average of six satellites and a correction time of 2 s.

Para conocer los parámetros en intervalos pequeños basta con descomponer las trayectorias en intervalos discretos; lo que se puede escribir de la siguiente forma:

$$x_i = d_i \cos \alpha, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$y_i = d_i \sin \alpha \quad (4)$$

Las distancias recorridas son divididas en intervalos discretos, mientras mayor sean éstos, mayor será la precisión de puntos discretos, de tal manera que la trayectoria queda:

$$d_j = \frac{d}{int} \quad (5)$$

Reacomodando las ecuaciones anteriores se obtienen:

$$\Sigma_{j=1}^k x_j = \Sigma_{i=1}^l d_{ij} \cos \alpha \quad (6)$$

$$\Sigma_{j=1}^k y_j = \Sigma_{i=1}^l d_{ij} \sin \alpha \quad (7)$$

De igual forma, para una trayectoria circular, la descomposición de datos en intervalos discretos es establecida, sin embargo, ésta es diferente. Se realiza una traza vectorial por cada grado recorrido; en donde, la distancia del vector es igual al radio, generado por el ángulo de giro característico del tractor agrícola, el cual, depende del ángulo que presentan las ruedas al ser rotado el eje horizontal. Una vez establecido cada uno de los vectores, la descomposición de los datos se realiza del mismo modo que el anterior. Por lo tanto, las ecuaciones para este caso quedarían:

$$\Sigma_{j=1}^k w_{xj} = \Sigma_{\alpha=1}^k r_j \cos \alpha \quad (8)$$

$$\Sigma_{j=1}^k w_{yj} = \Sigma_{\alpha=1}^k r_j \sin \alpha \quad (9)$$

Finalmente, cada una de las trayectorias obtenidas para son trazadas de manera continua, de tal manera, que se debe tener cuidado con los ángulos por los que el sistema tractor-implemento se está desplazando.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Deducción teórica de la trayectoria

Se consideró al tractor como una masa puntual, que realiza una trayectoria vectorial en 2D, sobre un campo de cultivo dado. De tal manera que, el movimiento comprende dos partes importantes de la mecánica, movimiento lineal y angular. Teniendo en cuenta los parámetros: tiempo, velocidad y ángulo de giro, los recorridos se componen de trayectoria lineal y angular, para lo cual se tiene:

$$X_i = t \cdot v \cdot \cos \emptyset \quad (10)$$

$$Y_i = t \cdot v \cdot \sin \emptyset \quad (11)$$

Donde, los dos primeros recíprocos dan como resultado una distancia. Se entiende que la parte lineal es un vec-

Theoretical plotting of the ideal trajectory

The linear part consists of two basic parameters:

$$x = d \cos \alpha \quad (1)$$

$$y = d \sin \alpha \quad (2)$$

To determine the parameters in intervals small enough to break down the trajectories into discrete intervals, which can be expressed as follows:

$$x_i = d_i \cos \alpha, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$y_i = d_i \sin \alpha \quad (4)$$

Travelled distances are divided into discrete intervals; the greater they are, the greater the accuracy of the discrete points, so that the trajectory is:

$$d_j = \frac{d}{int} \quad (5)$$

Resetting the above equations obtains:

$$\Sigma_{j=1}^k x_j = \Sigma_{i=1}^l d_{ij} \cos \alpha \quad (6)$$

$$\Sigma_{j=1}^k y_j = \Sigma_{i=1}^l d_{ij} \sin \alpha \quad (7)$$

Similarly, for a circular trajectory, data decomposition into discrete intervals is established; however, this is different. A vector plot was made for each degree travelled, wherein the vector distance equals the radius, generated by the turning angle characteristic of the farm tractor, which depends on the angle shown by the wheels when the horizontal axis is rotated. Once each of the vectors is established, data decomposition is performed in the same way as above. Therefore, the equations for this case would be:

$$\Sigma_{j=1}^k w_{xj} = \Sigma_{\alpha=1}^k r_j \cos \alpha \quad (8)$$

$$\Sigma_{j=1}^k w_{yj} = \Sigma_{\alpha=1}^k r_j \sin \alpha \quad (9)$$

Finally, each of the trajectories obtained for are plotted continuously, so that care must be taken with the angles through which the tractor-implement system is moving.

RESULTS AND DISCUSSION

Theoretical deduction of the trajectory

The tractor was considered as a point mass which makes a 2D vector trajectory over a given crop field. Thus, the movement comprises two important aspects of mechanics: linear and angular movement. Taking into account the parameters of time, speed and turning angle, the routes are composed of linear and angular trajectories, which give:

$$X_i = t \cdot v \cdot \cos \emptyset \quad (10)$$

$$Y_i = t \cdot v \cdot \sin \emptyset \quad (11)$$

tor, que comprende la dirección de ángulo formado entre las coordenadas al origen y el formado por el vehículo después del giro, de tal forma, para la parte angular se cumple la siguiente condición:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \quad (12)$$

La ecuación (12) es un vector velocidad dependiente del radio de giro comprendido entre las ruedas y el centro instantáneo de rotación, y del ángulo de dirección formado entre los radios de giro, los cuales presentan coordenadas relativas a partir de un origen definido. Reacomodando las ecuaciones (10) - (12) se tiene:

$$X_{\vec{\omega}} = (c_x + \cos \varphi)r \quad (13)$$

$$Y_{\vec{\omega}} = (c_y + \sin \varphi)r \quad (14)$$

donde:

$$\varphi = t \cdot \vec{\omega} \quad (15)$$

El radio de giro es un parámetro que depende del diseño del tractor, al igual que las distancias entre las ruedas delanteras, traseras, y del tipo de dirección. Las ecuaciones 13, 14 y 15 caracterizan los movimientos angulares; sin embargo, también es importante considerar los movimientos lineales de las labores agrícolas en combinación con las trayectorias angulares. Reajustando las ecuaciones 13 y 14 se obtienen:

$$X_v = d \cdot \cos \emptyset \quad (16)$$

$$Y_v = d \cdot \sin \emptyset \quad (17)$$

El ángulo presenta características importantes y si actúa como inicial, su valor establecido es 90° interpretando que se dirige en línea recta desde el punto de origen hasta la distancia final; si actúa como segundo, es el ángulo final formado desde el punto inicial hasta la trayectoria final, más un ángulo

Where the first two reciprocals give as a result a distance. It is understood that the linear part is a vector comprising the direction of angle formed by the coordinates at the origin and that formed by the vehicle after the turn, so that for the angular part the following condition is met:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \quad (12)$$

The equation (12) is a speed vector dependent on the turning radius between the wheels and the instant center of rotation, and the steering angle formed between the turning radii, which have relative coordinates from a defined origin. Resetting the equations (10) - (12) gives:

$$X_{\vec{\omega}} = (c_x + \cos \varphi)r \quad (13)$$

$$Y_{\vec{\omega}} = (c_y + \sin \varphi)r \quad (14)$$

where:

$$\varphi = t \cdot \vec{\omega} \quad (15)$$

The turning radius is a parameter that depends on the design of the tractor, the distances between both the front wheels and the rear wheels, and the type of steering. Equations 13, 14 and 15 characterize the angular movements; however, it is also important to consider the linear movements of farm work in combination with the angular trajectories. Resetting equations 13 and 14 gives:

$$X_v = d \cdot \cos \emptyset \quad (16)$$

$$Y_v = d \cdot \sin \emptyset \quad (17)$$

The angle presents important features and if it acts as the initial one, its set value is 90°, meaning that it goes in a straight line from the point of origin to the final distance; if it acts as a secondary angle, it is the final angle formed from the starting point to the final trajectory, plus a com-

CUADRO 1. Valores medios de cada tratamiento.

TABLE 1. Mean values of each treatment.

Tratamiento / Treatment	Error lateral (cm) / Lateral error (cm)
1 (V1T1)	2.20 c
2 (V1T2)	6.18 b
3 (V2T1)	6.47 b
4 (V2T2)	6.49 b
5 (V3T1)	7.03 ab
6 (V3T2)	7.85 a

Letras diferentes representan diferencia significativa ($P \leq 0.05$) con prueba de Tukey.

Different letters represent significant differences ($P \leq 0.05$) according to Tukey's test.

lo complementario para poder establecer el recorrido. Si se consideran las ecuaciones anteriores y se realiza el trazo de la trayectoria, se obtienen los recorridos teóricos ideales del tractor, que se muestran en la Figura 2.

Trayectoria en campo

Con relación a las pruebas en campo, se calibró y probó el sistema de guiado automático EZ-Guide 250 en el tractor Massey Ferguson 592T a velocidades de 5, 7 y 9 km·h⁻¹, en trayectorias de líneas AB y pivote central. En el recorrido de línea recta, a medida que la velocidad se incrementó de 5 a 9 km·h⁻¹, la media del error de la trayectoria aumentó de 2.2 hasta 7.0 cm; para el caso de pivote central, el comportamiento de la media del error fue de 6.1 a 7.8 cm. El Cuadro 1, muestra las medias de las desviaciones laterales en el tractor Massey Ferguson 592T, para cada tratamiento.

En las Figuras 3 y 4, se aprecia que a medida que incrementó la velocidad, el error (desviación lateral) también aumentó.

plementary angle in order to be able to establish the route. If the above equations are considered and the trajectory plotted, the theoretical ideal paths of the tractor, as shown in Figure 2, are obtained.

Field trajectory

With regard to the field tests, the EZ-Guide 250 automatic guidance system was calibrated and tested on the Massey Ferguson 592T tractor at speeds of 5, 7 and 9 km·h⁻¹, in AB line and center pivot trajectories. In straight line travel, as the speed increased from 5 to 9 km·h⁻¹, the mean trajectory error increased from 2.2 to 7.0 cm; in the case of center pivot travel, the mean error went from 6.1 to 7.8 cm. Table 1 shows the means of the lateral deviations in the Massey Ferguson 592T tractor, for each treatment.

In Figures 3 and 4, it can be seen that as the speed increased, the error (lateral deviation) also increased.

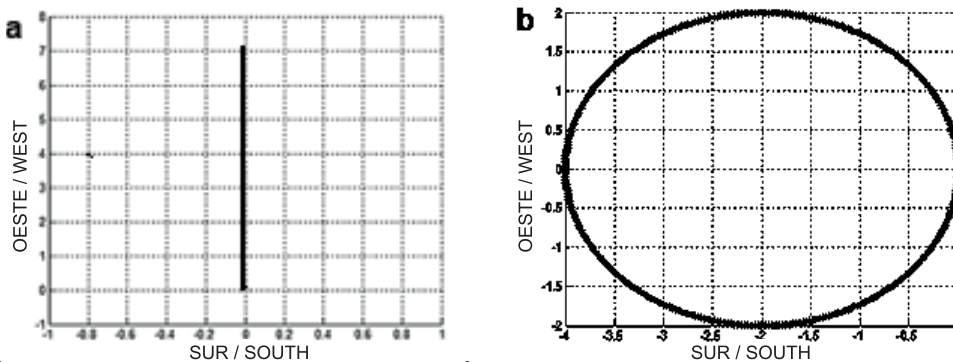


FIGURA 2. Trayectoria (a) lineal y (b) circular.
FIGURE 2. (a) linear and (b) circular trajectory.

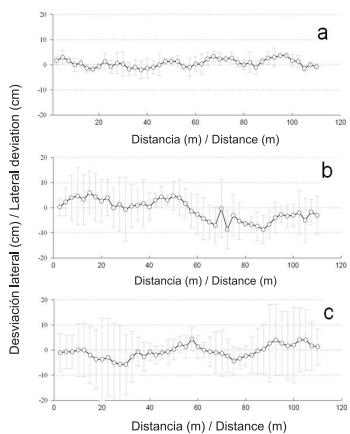


FIGURA 3. Trayectoria tipo lineal del tractor MF 592T a) 5, b) 7 y c) 9 km·h⁻¹.

FIGURE 3. Linear trajectory of the MF 592T tractor at a) 5, b) 7 and c) 9 km·h⁻¹.

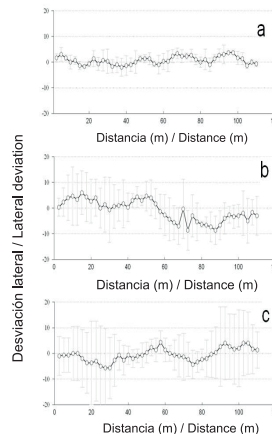


FIGURA 4. Trayectoria tipo circular del tractor MF 592T a) 5, b) 7 y c) 9 km·h⁻¹.

FIGURE 4. Circular trajectory of the MF 592T tractor at a) 5, b) 7 and c) 9 km·h⁻¹.

CONCLUSIONES

Se obtuvo una modelación del tractor considerándolo como masa puntual que realiza trayectoria en 2D obteniendo recorrido ideal sin errores. Además se observó que a medida que incrementó la velocidad, de 5 a 9 km·h⁻¹, el error en la trayectoria lineal incrementa de 2.0 a 7.0 cm, y para el caso del recorrido en pivote central o circular, con el mismo incremento de velocidad, incremento el error de 6.1 a 7.8 cm.

REFERENCIAS

- Buick, R., & White, E. (1999). Comparing GPS guidance with foam marker guidance. *Precision Agriculture*(precisionagric4b), 1035-1045.
- Derrick, J. B., & Bevly, D. M. (2009). Adaptive steering control of a farm tractor with varying yaw rate properties. *Journal of Field Robotics*, 26(6-7), 519-536. doi: 10.1002/rob.20291
- Feng, L., He, Y., Bao, Y., & Fang, H. (2005). *Development of trajectory model for a tractor-implement system for automated navigation applications*. Paper presented at the Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. Proceedings of the IEEE. doi: 10.1109/IMTC.2005.1604364
- Gan-Mor, S., Clark, R. L., & Upchurch, B. L. (2007). Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 59(1), 31-38. doi:10.1016/j.compag.2007.04.008
- Kise, M., Zhang, Q., & Rovira Más, F. (2005). A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. *Biosystems Engineering*, 90(4), 357-367. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.12.008
- Li, M., Imou, K., Wakabayashi, K., & Yokoyama, S. (2009). Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2(3), 1-16. doi: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.001-016
- Pedersen, S. M., Fountas, S., Have, H., & Blackmore, B. (2005). Agricultural robots: an economic feasibility study. *Precision Agriculture*, 5, 589-595. doi: 10.1007/s11119-006-9014-9
- Reid, J. F., Zhang, Q., Noguchi, N., & Dickson, M. (2000). Agricultural automatic guidance research in North America. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1), 155-167. doi: 10.1016/S0168-1699(99)00061-7
- Tillett, N. (1991). Automatic guidance sensors for agricultural field machines: a review. *Journal of agricultural engineering research*, 50, 167-187. doi: 10.1016/S0021-8634(05)80012-5

NOMENCLATURA

- X_v = Posición en x en función de la velocidad (m),
 X_w = Posición en x en función de la velocidad angular (m),
 X_L = Trayectoria lineal en x (adim),
 X_a = Trayectoria angular en x (adim),
 Y_v = Posición en y en función de la velocidad (m),
 Y_w = Posición en y en función de la velocidad angular (m),
 Y_L = Trayectoria lineal en y (adim),
 Y_a = Trayectoria angular en y (adim),
 d_j = Número de segmentos divididos por cada trayectoria (adim),
 \dot{v} = Velocidad angular (m·s⁻¹),

CONCLUSIONS

A modelling of the tractor in which it is regarded as a point mass that performs 2D trajectory was obtained, providing an error-free ideal path. It was also observed that as the speed increased from 5 to 9 km·h⁻¹, the error in the linear trajectory increases from 2.0 to 7.0 cm, and in the case of center or circular pivot travel, with the same increase in speed, the error increases from 6.1 to 7.8 cm.

NOMENCLATURE

- X_v = Position in x as a function of speed (m),
 X_w = Position in x as a function of angular speed (m),
 X_L = Linear trajectory in x (dimensionless),
 X_a = Angular trajectory in x (dimensionless),
 Y_v = Position in y as a function of speed (m),
 Y_w = Position in y as a function of angular speed (m),
 Y_L = Linear trajectory in y (dimensionless),
 Y_a = Angular trajectory in y (dimensionless),
 d_j = Number of segments divided by each trajectory (dimensionless),
 \dot{v} = Angular speed (m·s⁻¹),
 w_{xj} = Vectors in x (dimensionless),
 w_{yj} = Vectors in y (dimensionless),
 x_i = Coordinates x in interval i (m),
 y_j = Coordinates y in interval j (m),
 c_x, c_y = Coordinates of the center of rotation (m),
 d = Distance covered by the tractor (m),
 k = Trajectory travelled (°),
 r = Turning radius of the tractor (m),
 t = Time (s),
 T_o = Control treatment (dimensionless),
 v = Speed (m·s⁻¹),
 φ = Turning angle of the tractor (°),
 i = Number of required trajectories (dimensionless),
 int = Number of intervals (dimensionless),
 l = Number of intervals for each trajectory (dimensionless),
 x = Coordinates in axis x (m),
 y = Coordinates in axis y (m)

w_{xj} = Vectores en x (adim),
 w_{yj} = Vectores en y (adim),
 x_i = Coordenadas x en el intervalo i (m),
 y_i = Coordenadas y en el intervalo j (m),
 c_x, c_y = Coordenadas del centro de giro (m),
 d = Distancia recorrida por el tractor (m),
 k = Trayectoria recorrida ($^\circ$),
 r = Radio de giro del tractor (m),
 t = Tiempo (s),

T_0 = Tratamiento testigo (adim),
 v = Velocidad ($m \cdot s^{-1}$),
 φ = Ángulo de giro del tractor ($^\circ$),
 i = Número de trayectorias requeridas (adim),
 int = Número de intervalos (adim),
 l = Número de intervalos por cada trayectoria (adim),
 x = Coordenadas en el eje x (m),
 y = Coordenadas en el eje y (m),

