***TRABAJO PREVIO***

1. **Investigar:**

* **¿Qué es un filtro Kalman? Explicar el fundamento matemático en que se fundamenta el diseño del filtro**

Un filtro de Kalman es un algoritmo matemático que estima el estado de un sistema dinámico a partir de mediciones ruidosas. Rudolf E. Kalman lo desarrolló en la década de 1960 y se ha convertido en una herramienta fundamental en una amplia gama de aplicaciones. Es muy útil en situaciones donde las mediciones están sujetas a ruido o error, ya que el filtro Kalman puede proporcionar estimaciones más precisas considerando la incertidumbre de las mediciones.

El filtro Kalman opera en dos fases principales: la fase de predicción y la fase de actualización. En la fase de predicción, se utiliza el modelo dinámico del sistema para predecir el estado futuro del sistema y su incertidumbre. En la fase de actualización, se combinan estas predicciones con las mediciones actuales para obtener una estimación más precisa del estado actual del sistema.

* **¿Cómo se implementa el filtro Kalman en el sistema embebido Arduino? Definir los parámetros de entrada de la función.**

| horizontal-naranja | **PROGRAMA DE INGENIERÌA MECATRÓNICA**  **UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA - UNAB** |
| --- | --- |
| **DISEÑO DE OBSERVADORES - MANIPULADOR DE UN GRADO DE LIBERTAD**  ***M.Sc. Hernando González Acevedo*** |

***MODELO MATEMÁTICO***

1. Determinar el modelo matemático de un manipulador de un grado libertad acoplado a un motorreductor DC (figura 1). La variable de entrada al modelo es la señal de modulación de ancho de pulso (PWM) que modifica el voltaje de alimentación del motor (-100%≤PWM≤100%) y las variables de salida son la posición angular de la barra y la velocidad mecánica. Linealizar el modelo, asumiendo como punto de equilibrio , y representar la dinámica del sistema en espacio de estados. El modelo matemático debe incluir el estado de la corriente de armadura del motor DC.

|  |  |
| --- | --- |

*Fig. 1 Manipulador de un grado de libertad*

| Ecuaciones diferenciales (Modelo no lineal) |  |
| --- | --- |
| Punto de equilibrio |  |
| Modelo lineal en espacio de estados continuo |  |
| Autovalores de la matriz de estados en continua |  |
| Periodo de muestreo | Tm = 0.03 |
| Modelo lineal en espacio de estados discreto | gl hl |
| Autovalores de la matriz de estados en discreta |  |

***FILTRO KALMAN***

1. Programar en el sistema embebido un filtro Kalman y un filtro de media móvil. Comparar la respuesta transitoria, a la entrada y salida de cada filtro, de la posición angular (θ) y la velocidad angular (ω), para diferentes valores de la señal de control . Analizar el efecto de modificar los parámetros de cada filtro en la respuesta transitoria.

| Señal PWM |  |
| --- | --- |
| Comparación de la señal de entrada y salida del filtro Kalman – Posición angular de la barra |  |
| Comparación de la señal de entrada y salida del filtro Kalman – Velocidad angular |  |
| Comparación de la señal de entrada y salida del filtro de media móvil – Posición angular de la barra |  |
| Comparación de la señal de entrada y salida del filtro de media móvil – Velocidad angular |  |
| Análisis de los resultados |  |

***CONTROLADOR LQG (CONTINUA)***

1. Diseñar un controlador LQG en continua para regular la posición angular de la barra (). El controlador se diseña a partir de la técnica LQR y el observador es un filtro Kalman. La varianza de la señal de control () y la varianza del ruido del sensor () se determinan a partir de datos experimentales.

| **Diseño del controlador** | |
| --- | --- |
| Matriz **Q** |  |
| Matriz **R** |  |
| Matriz de ganancias |  |
| Polos en lazo cerrado |  |
| Potencia de ruido en la señal de control | [1e-8] |
| Potencia de ruido en la posición angular | [1e-8] |
| Respuesta transitoria de la variable del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado, dada una señal de referencia variable |  |
| Respuesta transitoria de la acción de control del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado |  |
| **Filtro Kalman** | |
| Matriz de covarianza Qn |  |
| Matriz de covarianza Rn |  |
| Matriz de ganancias |  |
| Polos del observador |  |
| **Respuesta transitoria del observador** | |
| Respuesta transitoria de la variable del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado, dada una señal de referencia variable |  |
| Respuesta transitoria de los estados reales (modelo no lineal) y los estados estimados |  |
| Respuesta transitoria de la acción de control del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado |  |

* Unificar en una sola representación de espacio de estados el controlador y el observador: control de dos grados de libertad.

| Representación en espacio de estados: Controlador de dos grados de libertad |  |
| --- | --- |

* Discretizar la estrategia de control LQG e implementar el controlador en el bloque de Matlab function. Determinar la matriz de ganancia antiwindup adecuada para el sistema de control. Evaluar la respuesta transitoria del sistema en lazo cerrado, dado un setpoint variable. Incluir ruido en la señal del actuador y la posición angular de la barra.

| Periodo de muestreo |  |
| --- | --- |
| Representación en espacio de estados discretos del controlador |  |
| Matriz antiwindup |  |
| Código del controlador en el bloque de Matlab function | function [u,Con\_out] = fcn(Sp,Pv,Con\_ini)  Gc = [0.523966818008876,0.0782855124325541,-0.100820826191194,0.105348989718112;0.0132088738475635,0.991367484590253,0.0289530105661962,0.000651705484506732;0.791279836062320,-0.555522722213387,0.909698456385056,0.0619332601210404;0,0,0,1];  Hc = [0.00174756461598906,-0.00174430609133644;5.03642823964450e-06,3.97073674635666e-05;0.000651713016402831,-0.000663568108338496;0.0300000000000000,-0.0300000000000000];  Cc = [-102.796775094684,18.8434497806392,-37.6657368965831,44.7213595499957];  Dc = [0 0];    u1max = 100;  u1min = -100;    Ka = zeros(4,1);    xk = Con\_ini(1:4); %n+r  Du = Con\_ini(5:5); %p    u = Cc\*xk + Dc\*[Sp;Pv];  xk\_1 = Gc\*xk + Hc\*[Sp;Pv] - Ka\*Du;      u1s = u(1);    if u(1)>=u1max  u1s = u1max;  end  if u(1)<=u1min  u1s = u1min;  end        %% Salida  ut = u1s;  Dunew = u - ut;  Con\_out = [xk\_1; Dunew]; |
| Respuesta transitoria de la variable del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado, dada una señal de referencia variable |  |
| Respuesta transitoria de la acción de control del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado |  |

* Programar en el sistema embebido el controlador y evaluar el comportamiento dinámico del regulador para diferentes puntos de operación (incluir valores de referencia que saturen el actuador). Comparar la respuesta transitoria que se obtienen a partir del modelo dinámico con los datos experimentales, dado un setpoint variable.

| Periodo de muestreo (Histograma del delta del vector de tiempo) |  |
| --- | --- |
| Magnitud del error | 6% |
| Setpoint – Pv Experimental - Pv Simulada |  |
| Señal Control Experimental – Señal de Control Simulada |  |
| Análisis de los resultados |  |

**Nota:** Para compensar la zona muerta del motorreductor, incluir el siguiente condicional, donde la variable Emin puede ser una constante o un porcentaje con relación al setpoint.

| Error = Sp – Pv  If abs(Error) > Emin  Calcular la señal de control u(k)  Else  Mantener la señal de control u(k-1)  end |
| --- |

***CONTROLADOR POR UBICACIÓN DE POLOS Y OBSERVADOR EN DISCRETA***

1. Diseñar un sistema de control digital para regular la posición angular de la barra () a partir de la señal de PWM utilizando la técnica de ubicación de polos.

| **Diseño del controlador** | | |
| --- | --- | --- |
| Matriz de Controlabilidad (M) |  | |
| Rango de la Matriz M |  | |
| Criterios de diseño | Sobrepaso | 0% |
| Tiempo de establecimiento | 4 [s] |
| Polos en lazo cerrado continua |  | |
| Polos en lazo cerrado discreta |  | |
| Matriz de ganancias |  | |
| Potencia de ruido en la señal de control | [1e-8] | |
| Potencia de ruido en la posición angular | [1e-8] | |
| Matriz antiwindup |  | |
| Código del controlador en el bloque de Matlab function | function [ut,Con\_out] = fcn(Sp,Pv,Con\_in, Xest)  Vk\_1 = Con\_in(1); % NÃºmero de integradores  Du = Con\_in(2); % Actuadores    u1max = 100;  u1min = -100;    Ka = zeros(1,1); %(r,p)    Ki = [2.208069660656375];  Kest = [106.389627162668,4.54202985096176,22.5481367796194];      en = Sp-Pv;  Vk = en + Vk\_1 - Ka\*Du;  u = Ki\*Vk - Kest\*Xest;    u1s = u(1);    if u(1)>=u1max  u1s = u1max;  end  if u(1)<=u1min  u1s = u1min;  end        %% Salida  ut = u1s;  Dunew = u - ut;  Con\_out = [Vk; Dunew]; | |
| Respuesta transitoria de la variable del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado, dada una señal de referencia variable |  | |
| Respuesta transitoria de la acción de control del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado |  | |

- Diseñar un observador de Luenberger y un filtro de Kalman para estimar los estados.

| **Observador de Luenberger** | | |
| --- | --- | --- |
| Matriz observabilidad (V) |  | |
| Rango de la matriz de observabilidad V |  | |
| Criterios de diseño | Sobrepaso | 0% |
| Tiempo de establecimiento | 2 [s] |
| Polos del observador () |  | |
| Mapeo de los polos |  | |
| Matriz de ganancias |  | |
| **Respuesta transitoria del observador** | | |
| Código del controlador en el bloque de Matlab function | function [ut,Con\_out,Xob] = fcn(Sp,Pv,Con\_in)  Vk\_1 = Con\_in(1); % NÃºmero de integradores  Xk\_1 = Con\_in(2:4); % Estados planta  Du = Con\_in(5); % Actuadores    u1max = 100;  u1min = -100;    Ka = zeros(1,1); %(r,p)    GL = [0.784437384092603,0.00531930682271875,-0.0168735214917902;0.0147638228309042,0.991053908598640,0.0294892447225049;0.940790474483479,-0.592389086150106,0.960114981651867];  HL = [0.00279792290617123;1.58234863317437e-05;0.00154787234807474];  CL = [0,1,0];  Ki = [2.208069660656375];  Kest = [106.389627162668,4.54202985096176,22.5481367796194];  %L = [0.0908370092518715;0.122492624265940;-1.34405909478463]; %Luenberger  L = [0.0908370092518715;0.122492624265940;-1.34405909478463]; %KALMAN      en = Sp-Pv;  Vk = en + Vk\_1 - Ka\*Du;  u = Ki\*Vk - Kest\*Xk\_1;  Xob = (GL-L\*CL)\*Xk\_1 + HL\*u + L\*Pv;    u1s = u(1);    if u(1)>=u1max  u1s = u1max;  end  if u(1)<=u1min  u1s = u1min;  end        %% Salida  ut = u1s;  Dunew = u - ut;  Con\_out = [Vk; Xob; Dunew]; | |
| Respuesta transitoria de la variable del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado, dada una señal de referencia variable |  | |
| Respuesta transitoria de los estados reales (modelo no lineal) y los estados estimados |  | |
| Respuesta transitoria de la acción de control del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado |  | |

| **Filtro Kalman** | |
| --- | --- |
| Matriz de covarianza Qn | R |
| Matriz de covarianza Rn |  |
| Matriz de ganancias |  |
| Polos del observador |  |
| **Respuesta transitoria del observador** | |
| Código del controlador en el bloque de Matlab function | function [ut,Con\_out,Xob] = fcn(Sp,Pv,Con\_in)  Vk\_1 = Con\_in(1); % NÃºmero de integradores  Xk\_1 = Con\_in(2:4); % Estados planta  Du = Con\_in(5); % Actuadores    u1max = 100;  u1min = -100;    Ka = zeros(1,1); %(r,p)    GL = [0.784437384092603,0.00531930682271875,-0.0168735214917902;0.0147638228309042,0.991053908598640,0.0294892447225049;0.940790474483479,-0.592389086150106,0.960114981651867];  HL = [0.00279792290617123;1.58234863317437e-05;0.00154787234807474];  CL = [0,1,0];  Ki = [2.208069660656375];  Kest = [106.389627162668,4.54202985096176,22.5481367796194];  %L = [0.0908370092518715;0.122492624265940;-1.34405909478463]; %Luenberger  L = [1.97870165160901e-06;4.44347573756390e-05;-2.44210589797653e-05]; %KALMAN      en = Sp-Pv;  Vk = en + Vk\_1 - Ka\*Du;  u = Ki\*Vk - Kest\*Xk\_1;  Xob = (GL-L\*CL)\*Xk\_1 + HL\*u + L\*Pv;    u1s = u(1);    if u(1)>=u1max  u1s = u1max;  end  if u(1)<=u1min  u1s = u1min;  end        %% Salida  ut = u1s;  Dunew = u - ut;  Con\_out = [Vk; Xob; Dunew]; |
| Respuesta transitoria de la variable del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado, dada una señal de referencia variable |  |
| Respuesta transitoria de los estados reales (modelo no lineal) y los estados estimados |  |
| Respuesta transitoria de la acción de control del modelo lineal y del modelo no lineal en lazo cerrado |  |

* Programar en el sistema embebido el controlador y evaluar el comportamiento dinámico del regulador para diferentes puntos de operación (incluir valores de referencia que saturen el actuador). Comparar la respuesta transitoria que se obtienen a partir del modelo dinámico con los datos experimentales, dado un setpoint variable.

| Periodo de muestreo (Histograma del delta del vector de tiempo) |  |
| --- | --- |
| Magnitud del error |  |

| **Observador de Luenberger** | |
| --- | --- |
| Setpoint – Pv Experimental - Pv Simulada |  |
| Señal Control Experimental – Señal de Control Simulada |  |
| Señal de los estados estimados (Experimental) |  |
| Análisis de los resultados |  |

| **Filtro Kalman** | |
| --- | --- |
| Setpoint – Pv Experimental - Pv Simulada |  |
| Señal Control Experimental – Señal de Control Simulada |  |
| Señal de los estados estimados (Experimental) |  |
| Análisis de los resultados |  |

* ¿Cuál observador realiza una mejor estimación de los estados? Justificar la respuesta.

| Rta |  |
| --- | --- |

**Nota:** Para compensar la zona muerta del motorreductor, incluir el siguiente condicional, donde la variable Emin puede ser una constante o un porcentaje con relación al setpoint.

| Error = Sp – Pv  If abs(Error) > Emin  Calcular la señal de control u(k)  Else  Mantener la señal de control u(k-1)  end |
| --- |

***CONCLUSIONES.***

1. Establecer las conclusiones más relevantes del desarrollo del laboratorio.

|  |
| --- |

***VIDEO CON LOS RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN EXPERIMENTAL***

1. Realizar un video en el cual se valide el funcionamiento del sistema de control. En el video se debe observar de forma simultánea el movimiento de la barra, para diferentes valores de referencia, como la representación gráfica de la respuesta transitoria, que incluirá la señal de referencia, la variable controlada y la variable manipuladora, tal como se visualiza en la interfaz del sistema embebido.

| Controlador LQG | <https://youtu.be/U-0Uzb0eOtg> |
| --- | --- |
| Controlador por ubicación de polos y observador Luenberger | <https://youtu.be/C-KF_3KOTIA> |
| Controlador por ubicación de polos y filtro Kalman | <https://youtu.be/xTPBpllhAwo> |

***ANEXOS.***

| Código fuente del sistema embebido – Filtro Kalman y filtro de media móvil |  |
| --- | --- |
| Código fuente del sistema embebido - Controlador LQG |  |
| Código en el sistema embebido del controlador y observador |  |