

Model of a Network Control System for a MRaaS.

Carlos Pillajo
 Department of
 Control Engineering
 Universidad Politécnica Salesiana
 Quito, Ecuador
 Email: cpillajo@ups.edu.ec

Roberto Hincapié
 Department of
 Telecommunications Engineering
 Universidad Pontificia Bolivariana
 Medellin, Colombia.
 Email: roberto.hincapie@upb.edu.co

Abstract—Currently many designs and communications applications involving the control and computation is performed, generating network control systems, which are systems consisting of a multitude of integrated entities, sensor nodes coupled through a common communication network for manipulation and control of physical processes, so it is necessary to efficient use of available communication resources without reducing the efficiency or stability control systems of processes, which is why changes are occurring paradigms the design of digital control, this has motivated researchers to seek schemes that consider communications restrictions to control physical processes as well as event-triggered control. In this paper we will integrate a model of optimal control subject to communication restrictions for coupling to a Robotic Manipulator as a Service.

Index Terms— Control Systems Network, MRaaS, events Activated Control, Optimization

Resumen - Actualmente se realiza muchos diseños y aplicaciones que involucran las comunicaciones, el control y la computación, generándose sistemas de control en red, que son sistemas que consisten en una multitud de entidades integradas, nodos sensores acopladas a través de una red de comunicación común para la manipulación y control de procesos físicos, por lo tanto es necesario el uso eficiente de los recursos disponibles como la comunicación sin disminuir la eficiencia ni la estabilidad de los sistemas de control de los procesos, razón por lo cual se están dando cambios de los paradigmas en el diseño del control digital, esto ha motivado a los investigadores en buscar esquemas que consideren las restricciones de comunicaciones para el control de procesos físicos, así como el control activado por eventos. En este trabajo vamos a integrar un modelo de control óptimo sujeto a restricciones de comunicación para acoplarlo a un Manipulador Robótico como Servicio.

Palabras Clave— Sistemas de control en Red, MRaaS, Control Activado por eventos, Optimización

I. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas de Control en Red (NCS) normalmente utilizan un muestreo periódico [1] de los nodos sensores en combinación con el tiempo de disparo o a su vez una comunicación disparada por evento entre el sensor el controlador y el actuador [2]. En trabajos recientes [1], [3], [4], el muestreo disparado por evento ha sido propuesto como un medio para la utilización de recursos más eficientes en el control de red, Básicamente la idea es muestrear, comunicar y controlar sólo cuando ha ocurrido algo significativo en el sistema, por lo tanto, al introducir un tiempo muerto en el sensor se desea conseguir un equilibrio entre el tráfico de red y el rendimiento del lazo de control. Mediante el control basado en eventos se desea reducir la comunicación entre los sensores, el controlador y los actuadores en un lazo de control figura 1, mediante

la innovación de una comunicación entre estos componentes sólo después de que un evento ha indicado que un error de control excede de un límite tolerable [3]. Los mecanismos de activación han sido nominados de diferente manera como muestreo basado en eventos, muestreo por eventos, muestreo Lebesgue, muestreo de banda muerta o el muestreo de paso a nivel, aunque en concepto no tienen mucha diferencia, todos se refieren a la situación en que la acción de control no se invoca periódicamente provocada por una seal de reloj, sino a que la demanda de comunicación es activada por un error de control, o que una señal sobrepase un determinado umbral. El presente



Fig. 1. Diagrama de bloques de NCS para un MRaaS

documento integra un modelo adaptativo con restricción en la comunicación con una implementación de un Manipulador Robótico como servicio en la nube para controlar y monitorear un dispositivo robótico a cuyo diagrama de bloques está en la Figura 1, los contenidos previos deben estar distribuidos en las áreas de robótica e informática e implementación de los Servicios Web

Una manera de innovación a las interfaces de usuario que comúnmente se utilizan en este tipo de manipuladores se implementó un sistema de tele-operación a través de la nube que permita el control del brazo robótico mediante el movimiento del brazo del usuario basado en el dispositivo Kinect de Microsoft, adicionalmente se permitirá que la conectividad entre la estación del cliente y la estación de trabajo sea realizada desde cualquier lugar mediante la conexión a un servicio publicado en la nube.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Para concentrar las investigaciones de este documento en un solo elemento se supone que la planta es estable y no se produce incertidumbres del modelo, así como en [3], el enlace de comunicación se asume que reaccionan instantáneamente, en comparación con las constantes de tiempo de la planta, de modo que no hay ningún retardo de tiempo entre la generación de eventos y la recepción de los datos por el generador de entrada de control. En [2] se considera un sistema donde un número independiente de controladores disparados por tiempo o lazos de control activados por eventos están cerrados sobre una red de comunicación compartido., donde cada planta se describe por un sistema estocástico lineal de primer orden, en el caso de ser activada por evento un sensor en cada planta con frecuencia muestrea la salida, pero los intentos por comunicarse sólo se da cuando la magnitud de la salida está por encima de un umbral. Una vez que el acceso a la red se ha ganado, la red está ocupada por segundos T correspondientes a la demora en las comunicaciones desde el sensor al actuador. En [3] una comunicación se invoca sólo si el efecto de la perturbación alcanza un determinado límite, para evaluar el desempeño actual y determinar la entrada de control, tanto el generador de eventos y la entrada de control generador incluye una copia del estado del sistema de retroalimentación continua. En [4] considera múltiples entidades de los sistemas de control heterogéneos que están acoplados a través de un medio de comunicación común. Cada sistema de control podrá decidir sobre su información, ya sea una actualización de estado se transmite al controlador a través de un medio basado en contención. El objetivo es diseñar un esquema de control y la transmisión descentralizada óptima que minimiza la función de coste cuadrática, para lo cual considera que la ley de control está predefinido por un controlador de impulso y el activador de eventos está dada por una política de nivel de activación, donde el umbral de evento es el parámetro de diseño que se va a establecer adecuadamente, donde los subsistemas pueden ser heterogéneos y están modelados como sistemas de tiempo discreto lineales estocásticos con dimensión estatal arbitraria En [5], se considera la tasa de envío óptimo para los sistemas de control en red (NCS) con diferentes esquemas de comunicación. Por lo tanto, se compara control de tiempo desencadenada con un Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) o una División de Frecuencia (Acceso múltiple por FDMA) protocolo de comunicación y control basado en eventos con un Acceso Múltiple (CSMA), determinando que el control por evento bajo CSMA con acceso prioritario dio costo más bajo entre todos los esquemas considerados, como lo confirma en [2]

En [6] se estudia cómo el diseño de protocolo para diversas funcionalidades dentro de una arquitectura de red de comunicación puede ser visto como un problema de asignación de recursos distribuidos. Esto implica la comprensión de cuáles son los recursos, cómo distribuir de manera justa, y quizás lo más importante, la forma de lograr este objetivo de manera distribuida y estable. Luego pasamos se estudia los controladores que permiten una solución descentralizada de este problema. Estos controladores son el equivalente analítico de protocolos en uso en Internet hoy en día, y

que describen los protocolos existentes como realizaciones de dichos controladores. El Internet es un sistema dinámico con retardos de realimentación y los flujos que llegan y salen, lo que significa que la estabilidad del sistema no se puede dar por sentado

III. MODELO A CONSIDERAR

En la implementación realizada se considera a la red de comunicación (nube) en el lazo de retroalimentación, se ha considerado principalmente como una entidad con recursos limitados una vez que el activador de eventos decide transmitir datos al controlador. Sin embargo, tal afirmación no se puede suponer en muchos sistemas de comunicación prácticos, donde los mensajes de datos se retrasaron o incluso se pierden. Esto nos motiva a estudiar el diseño de controladores óptimos activados por eventos en presencia de tanto tiempo de retardo y de abandono de paquetes. Esto nos anima a identificar diferentes condiciones para el modelo de comunicación. Uno de los requisitos previos para el modelo de comunicación es un canal de reconocimiento sin errores, En [7] si bien (i) el canal de actualización es sin retrasos o (ii) el enlace del lazo de realimentación es libre de errores o (iii) los intervalos entre los tiempos de transmisión posteriores se limita a ser igual o mayor que el tiempo de ida y vuelta.

A. Control de Activación de Eventos bajo Retrasos de comunicación y pérdida de paquetes

La contribución de aplicar este modelo de algoritmo para un sistema de control disparado por evento según [8], donde cada subsistema ajusta su mecanismo de evento de activación de forma óptima con el fin de cumplir con una restricción de recursos impuesta por la red de comunicación. El problema se formula desde un marco de Procesos de Decisión Markoviana MDP con un criterio de costo promedio. Cada subsistema se modela como un sistema estocástico lineal de tiempo discreto con un control de costes cuadrática. La restricción de la comunicación es dada mediante la limitación de la velocidad de transmisión media total de todos subsistemas. Tal formulación se ha aplicado con éxito para aproximarse a un sistema de comunicación con un número limitado de intervalos de transmisión por paso de tiempo.

Notación: En este trabajo, el operador $(.)^T$ y $\text{tr}[\cdot]$ denotan el operador de transposición y traza, respectivamente, la norma euclidiana está denotado por $\|\cdot\|_2$. La variable P denota la probabilidad medir el espacio de muestra abstracto denotado por Ω . La expresión F, P - a.s denota que el evento F ocurre casi seguramente con la medida de probabilidad P . El operador de valor esperado denotado por $E[\cdot]$ y el operador de valor esperado condicional se denota por $E[\cdot|\cdot]$. La relación $x \sim N(0, X)$ indica una Variable aleatoria gaussiana con media cero y matriz de covarianza X . El operador $[\cdot]^+$ indica la proyección sobre la recta real no negativo, es decir, $[\cdot]^+ = \max\{0, \cdot\}$. El operador $1_{\{\cdot\}}$ denota la función indicador. La secuencia truncada hasta el momento K de la señal $x_k, k \geq 0$, se denota por X_K , es decir, $X_K = [x_0, \dots, x_K]$. Si no se indica lo contrario, una variable con i superíndice indica que pertenece a subsistema i , para nuestro caso $i = 1$

La Figura 1 representa el sistema de control en red bajo consideración. Muestra subsistemas de control independiente N cuyos ciclos de retroalimentación están conectados a través de una comunicación compartida red. Un subsistema de control I consiste en un proceso P_i , un C_i controlador que se implementa en el actuador y un sensor de S_i . El P_i proceso está dada por un controlador dado por la cadena de Markov en tiempo homogéneo con toma valores de estado x_k en R_n y evolucionando por la siguiente ecuación en diferencias.

$$X_{K+1} = AX_K + Bu_K + W_K \quad (1)$$

Donde $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, la entrada de control $u_K \in R^m$, el ruido del sistema $W_K \sim N(0, W)$, el estado inicial x_0 tiene una distribución cuya función de densidad es simétrica alrededor del valor medio $E[x_0]$ y tiene un segundo momento finito, a cada paso de tiempo K el planificador situado en la estación del sensor S decide cuando debería actualizar y enviar al controlador C sobre la red, el planificador es descrito por la variable $\delta_K \in \{0, 1\}$, donde :

$$\delta_K = \begin{cases} 1 & \text{actualiza } x_K \text{ y es enviado} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

El receptor de la señal del controlador Z_K , esta dado por :

$$Z_K = \begin{cases} x_K & \delta_K = 1 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3)$$

Con el fin de cuantificar los recursos de restricción de la red de comunicación, la velocidad de transmisión individual promedio está definido como :

$$r = \lim_{T \rightarrow \infty} \sup \frac{1}{T} E \left[\sum_{K=0}^{T-1} \delta_K \right] \quad (4)$$

Y la velocidad promedio de transmisión es $y = r$ (4), si se tiene un solo subsistema. La restricción de la comunicación está dado por el límite total del promedio de la velocidad de transmisión

$$y \leq c, c > 0 \quad (5)$$

Se ha demostrado que la restricción de la comunicación en (5) es notablemente adecuada para comunicaciones aproximadas de sistemas con un número limitado de intervalos de transmisiones por paso de tiempo.

En particular el óptimo elemento disparado por el controlador basado en esta aproximación converge a la solución óptima con el número limitado de transmisiones por paso de tiempo, por lo tanto la restricción (5) sirve de modelo adecuado., cada subsistema tiene una función de costo J , dada por el criterio de lineal cuadrática promedio.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \sup \frac{1}{T} E \left[\sum_{K=0}^{T-1} x_K^T Q_K x_K + u_K^T Q_u u_K \right] \quad (6)$$

La matriz de pesos Q_x es definida positiva y Q_u es semi definida positiva, se asume que el par (A, B) , es estable y es detectable. Se asume que el sensor y el controlador del subsistema se tiene pleno conocimiento da los parámetros locales. Estos son A, B, W la distribución de x_0 , y Q_x, Q_u de (6)

La ley de control $\gamma = \{\gamma_0, \gamma_1, \dots\}$ refleja el comportamiento del controlador C es descrito por el mapa causal γ_K de la pasada observación para cada paso de tiempo k $u_K = \gamma_K(Z_K)$, donde Z_K es el observador histórico hasta el tiempo k del subsistema bajo análisis

Se distingue dos clases de planificadores $\pi = \{\pi_0, \pi_1, \dots\}$, resultado de dos tipos de administradores de red. En el primer caso el administrador de red difunde un parámetro fijo λ inicialmente y el disparador de eventos está dado por :

$$\delta_K = \pi_K^\lambda(X_K) \quad (7)$$

donde X_k es el estado histórico del subsistema. En el segundo caso el parámetro de red $\hat{\lambda}_x$ cambia cada tiempo k y el planificador se adapta a su ley a $\hat{\lambda}_x$

$$\delta_K = \pi_K^{\hat{\lambda}_x}(X_K) \quad (8)$$

El parmetro $\hat{\lambda}_x$ por si mismos están dados por un mapa causal f_K de las transmisiones históricas

$$\hat{\lambda}_K = f_K(\delta_0, \dots, \delta_K) \quad (9)$$

El objetivo es encontrar una ley de control óptimo γ y una ley de planificador óptimo π que minimicen el costo dado como un promedio de costos mientras satisface las restricciones de velocidad definidas en (5) El costo es definido por la suma de los individuales costos J para cada subsistema y para un subsistema el costo de optimización puede ser resumido como sigue:

$$\min_{\gamma, \pi} J^1(\gamma, \pi) \quad \text{si } y \leq c \quad (10)$$

En [8], se acoje a que la equivalencia del controlador es óptima, por lo tanto, la ley de control esta dada para un subsistema por:

$$u_K = \gamma_K^*(Z_K) = LE[X_K | Z_K] \quad (11)$$

Donde : $L = (B^T P B + Q_u)^{-1} B^T P A$ y P es la solución algebraica de la Ecuación de riccati y el estimador óptimo puede ser descrito como :

$$E[X_K | Z_K] = \begin{cases} X_K & \delta_K = 1 \\ (A - BL)E[X_{K-1} | Z_{K-1}] & \delta_K = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Con $E[x_0 | Z_0] = E[x_0]$ para $\delta_0 = 0$, cabe sealar que la ley de control óptimo es independiente de , por lo tanto la ley de control puede aplicarse antes de la ejecución sin conocimiento adicional.

Por definición el error de estimación

$$e_K = x_K - E[x_K | Z_{K-1}] \quad (13)$$

El problema restante es determinar la ley del planificador óptimo π^λ , se puede lanzar como la siguiente MDP con estado e_K

$$\min_{\pi^\lambda} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\sum_{k=0}^{T-1} (1 - \delta_k) e_K^T Q_e e_K + \lambda \delta_K \right] + tr[PW] \quad (14)$$

Donde $Q_e = L^T(Q_u + B^T P B)L$ y e_K es descrito como un δ_k controlada por la cadena de markov envuelta en la siguiente ecuación de diferencias.

$$e_{K+1} = (1 - \delta_K) A e_K + w_K \quad (15)$$

