

MPC con Conjunto Finito de Control para Seguimiento de Camino

Román Comelli, Ernesto Kofman y Diego Feroldi
CIFASIS - CONICET, FCEIA - UNR, Rosario, Argentina
Email: {comelli,kofman,feroldi}@cifasis-conicet.gov.ar

Resumen—En este trabajo se aborda el problema de seguimiento de camino para robots tipo auto mediante la aplicación de una técnica de Control Predictivo basado en Modelo (MPC) que utiliza un conjunto finito de valores posibles en la variable de entrada, denominada MPC con Conjunto Finito de Control. Este enfoque simple y eficiente permite tratar de forma explícita las no linealidades y restricciones a costa de sacrificar parcialmente la resolución en el movimiento de la dirección del vehículo, lo cual en la práctica no afecta el desempeño debido a la presencia de ruido. Además de describir la estrategia, se presentan simulaciones y comparaciones contra otras técnicas de control basadas en MPC que ilustran las ventajas del esquema propuesto.

Index Terms—MPC, seguimiento de camino, robótica móvil, agricultura de precisión

I. INTRODUCCIÓN

Un problema fundamental de la robótica móvil es el de garantizar el seguimiento de camino con una precisión adecuada. En aplicaciones agrícolas, la importancia de esto radica en evitar colisionar con los cultivos así como también en poder maniobrar eficientemente en las cabeceras.

Entre los robots que abordan tareas en entornos rurales, frecuentemente encontramos estructuras tipo auto caracterizadas por tener cuatro ruedas, siendo las delanteras las que determinan la dirección del vehículo. Estas, típicamente, solo pueden girar respetando la geometría de Ackerman, lo cual se logra mediante algún sistema con barras de acople, requiriendo por lo tanto un único actuador para ser controladas.

Puntualmente, en [1] se presenta un prototipo de robot desmalezador desarrollado en el CIFASIS (CONICET-UNR) que sigue esta disposición similar a la de los autos, en la que el actuador mencionado es un motor paso a paso. Por cuestiones mecánicas, la velocidad de giro de la dirección se encuentra limitada, no pudiéndose variar demasiado el ángulo correspondiente en un período de muestreo. Del mismo modo, por la irregularidad del terreno en el campo así como también por motivos mecánicos, pretender ajustes muy finos en dicho ángulo tampoco es viable. Estas condiciones motivan a pensar el cambio en la dirección entre instantes de muestreo como perteneciente a un conjunto finito de tres elementos posibles: $\{-\Delta\delta_f, 0, \Delta\delta_f\}$, siendo $\Delta\delta_f \in \mathbb{R}^+$ un ángulo fijo. En nuestro prototipo [1], este ángulo fijo puede ser el resultante de mantener constante la velocidad del motor paso a paso mencionado durante todo el período de muestreo. En robots con disposiciones y/o actuadores diferentes, que *a priori* serían más versátiles pero más complejos [2], [3], la idea propuesta también podría aplicarse si tuviera sentido hacer las mismas consideraciones respecto del cambio en el ángulo de la dirección.

Las técnicas de Control Predictivo basado en Modelo (MPC, por sus siglas en inglés) [4] permiten aprovechar el conocimiento de referencias futuras y considerar restricciones por lo que resultan ideales para abordar tareas de seguimiento de camino [5], [6]. En particular, la existencia de un número reducido de acciones de control posibles, que de lo explicado previamente se corresponden con doblar $\Delta\delta_f$ hacia un lado, mantenerse derecho o doblar $\Delta\delta_f$ hacia el otro lado, sugiere la posibilidad de aplicar una técnica de control basada en MPC conocida como MPC con Conjunto Finito de Control (FCS-MPC, también por sus siglas en inglés) al problema de seguimiento de camino. Hasta donde sabemos, esto no ha sido planteado anteriormente en la literatura, al menos del modo abordado en este trabajo. FCS-MPC es una estrategia de control utilizada principalmente en convertidores electrónicos de potencia, donde la acción de control también se encuentra en un conjunto de pocos elementos dados por las posibles combinaciones de los estados de las llaves que tenga la topología circuital en cuestión [7].

La contribución de este trabajo es una propuesta de control novedosa, simple y altamente paralelizable basada en FCS-MPC que resuelve el problema de seguimiento de camino para un robot agrícola tipo auto. Se presentan además simulaciones que validan el buen desempeño de la técnica desarrollada y se comparan los resultados con otras estrategias de control basadas en MPC.

El resto del trabajo se organiza del siguiente modo. La Sección II trata sobre cuestiones previas como los modelos usados y algunos trabajos relacionados con lo hecho para esta publicación. La Sección III desarrolla la propuesta de control basada en FCS-MPC. Luego, los resultados de las simulaciones y el análisis de los mismos se presentan en la Sección IV. Finalmente, en la Sección V se enuncian las conclusiones y se define una línea de trabajo futuro.

II. PRELIMINARES

II-A. Modelos

Debido a la geometría de Ackerman, los robots tipo auto suelen representarse con el modelo de bicicleta. Discretizado mediante la aproximación de *forward* Euler, dicho modelo, que se encuentra esquematizado en la Figura 1, es el siguiente:

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + v(k) \cos(\theta(k))\Delta t, \\ y(k+1) = y(k) + v(k) \sin(\theta(k))\Delta t, \\ \theta(k+1) = \theta(k) + \frac{v(k)}{L} \tan(\delta(k))\Delta t, \end{cases} \quad (1)$$

donde $k \in \mathbb{N}_0$, $\mathbf{p} = [x, y]^T \in \mathbb{R}^2$ es la posición del centro de la rueda trasera en coordenadas cartesianas, $\theta \in [-\pi, \pi)$ es la

orientación, $v \in \mathbb{R}$ es la velocidad lineal de la rueda trasera, $\delta \in [\delta_{min}, \delta_{max}]$ es el ángulo de la dirección, limitado por $\delta_{min} \in \mathbb{R}^-$ y $\delta_{max} \in \mathbb{R}^+$, los valores mínimo y máximo respectivamente, $\Delta t \in \mathbb{R}^+$ es el período de muestreo y $L \in \mathbb{R}^+$ es un parámetro que representa la distancia entre los centros de las ruedas. Este modelo en espacio de estados se puede representar en forma compacta como

$$\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)), \quad (2)$$

siendo $\mathbf{x} = [x, y, \theta]^T$ el estado, $\mathbf{u} = [v, \delta]^T$, la entrada y $f : \mathbb{R}^2 \times [-\pi, \pi] \times \mathbb{R} \times [\delta_{min}, \delta_{max}] \rightarrow \mathbb{R}^2 \times [-\pi, \pi]$, la función dada en (1).

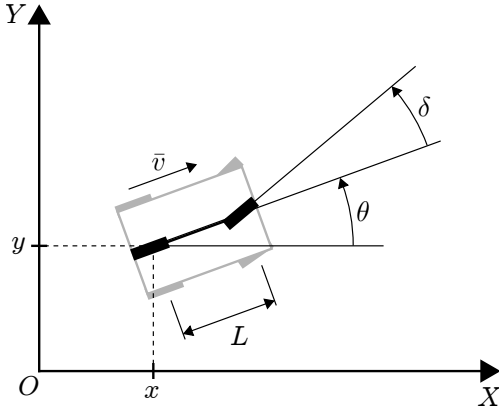


Figura 1. Esquema de un robot tipo auto representado como bicicleta.

Si bien este modelo cinemático es adecuado para el diseño de controladores, resulta demasiado simple para ser usado como planta en una simulación. A un robot tipo auto no se le puede imponer una velocidad lineal ni un ángulo de dirección dado que es un sistema dinámico, con inercias. Usualmente los robots tienen controladores de bajo nivel que ajustan dichas variables en función de referencias recibidas desde un control de jerarquía superior y según las posibilidades de sus actuadores. Por ejemplo, el ángulo de dirección de las ruedas delanteras del robot agrícola presentado en [1] evoluciona a velocidad constante hasta la referencia deseada debido al tipo de actuador, ya mencionado, que posee. Otra cuestión importante ignorada en (1) es el deslizamiento que aparece entre las ruedas y el piso, especialmente apreciable en entornos rurales, que suelen ser irregulares. Para darle mayor validez a los experimentos, en las simulaciones presentadas en la Sección IV se utilizó, para representar al robot, un modelo dinámico de orden 15 que contempla estas cuestiones, incorporando deslizamiento y los controladores de bajo nivel.

II-B. Seguimiento de trayectoria y de camino con MPC

Diversas formulaciones de MPC han sido planteadas para hacer seguimiento de trayectoria y de camino. Conceptualmente, estos problemas se diferencian en tener o no una parametrización temporal del estado a seguir. En [8] se aborda el primer problema mencionado sobre un robot tipo monociclo a partir de un esquema de control con realimentación y acción *feedforward*. Dado que se tiene a disposición una trayectoria de referencia factible con las entradas correspondientes, estas últimas pueden aplicarse directamente. La acción por realimentación, utilizada para compensar perturbaciones, se obtiene mediante un controlador MPC Lineal

(LMPC) formulado con un modelo del error de seguimiento expresado en el marco de referencia local del robot real. Este esquema requiere linealizar la dinámica de dicho error en cada instante de muestreo. Además, se agregan restricciones en velocidad y aceleración para evitar deslizamiento. En [9] se implementa la misma idea pero con MPC explícito [10]. Por su parte, en [11] se utiliza una estrategia similar pero el modelo del error de seguimiento queda expresado en un marco de referencia global. Además, en este último trabajo se compara el esquema de LMPC con un enfoque basado en MPC No Lineal (NMPC).

El trabajo de Phung et al. [12] también aplica NMPC aunque con el objetivo de seguir puntos de paso o *waypoints*, evitando obstáculos. En este caso no se utiliza un modelo dinámico del error sino directamente el del sistema físico, que es un monociclo. Los autores evitan resolver la optimización que plantean a través de métodos tradicionales. En lugar de eso, aplican una estrategia de búsqueda sistemática que consiste esencialmente en cuantificar las posibles entradas (velocidad lineal y angular), hacer un gran número de simulaciones del sistema a lazo abierto y, mediante una función de costo hecha a medida, seleccionar y aplicar la primera acción de control de la secuencia de entradas cuyo costo haya sido el mínimo. La implementación de esta propuesta se hace en una Placa de Video (GPU).

Conceptualmente, la idea descrita en [12] tiene similitud con lo presentado aquí, en el sentido de considerar las entradas cuantificadas y hacer simulaciones para resolver la optimización. Sin embargo, el problema atacado en el presente trabajo es el de seguimiento de camino y la metodología con la que se lo aborda es marcadamente distinta, como se verá más adelante.

Por último, con respecto al uso de MPC en aplicaciones agrícolas, en [13] se hace una revisión amplia, focalizando también en cuestiones de navegación y seguimiento de camino. Por lo general, muchas de las publicaciones que tratan estos temas se centran en cuestiones no consideradas en este trabajo como ser la presencia de deslizamiento [14], [15] y el control con implementos remolcados o tráilers [16], [17].

II-C. FCS-MPC

Las estrategias de MPC normalmente buscan resolver un problema de optimización con restricciones para encontrar una secuencia de entradas óptima. En la mayoría de las aplicaciones, dichas entradas pertenecen a un conjunto continuo por lo que el problema mencionado puede llegar a resolverse analíticamente o mediante algoritmos iterativos basados en el cómputo del gradiente de una función de costo.

Si bien en electrónica de potencia se puede aplicar MPC de este modo, la actuación a través de llaves que solo pueden estar abiertas o cerradas motiva una forma diferente de encarar la optimización denominada FCS-MPC [7]. Por ejemplo, en un inversor trifásico de tensión de dos niveles, que posee tres piernas que pueden estar en dos estados posibles cada una, existen $(2^3)^{H_c}$ secuencias de entrada posibles a aplicar, siendo H_c el horizonte de control, por lo general tomado como unitario. Teniendo un modelo de la planta y midiendo o estimando sus variables de estado, dado lo reducido de las secuencias de acciones de control factibles, se puede predecir la evolución para cada una y aplicar el primer valor de la

secuencia que minimice una función de costo definida para la aplicación en cuestión. En resumen, con FCS-MPC, la optimización se reduce a una búsqueda en un conjunto finito, que incluso puede pensarse como el problema de recorrer un árbol.

III. ESTRATEGIA PROPUESTA

III-A. Definición del problema

El objetivo de este trabajo es hacer seguimiento de camino utilizando el modelo (1) considerando como entrada de control el ángulo δ de la dirección. Dicha variable, además de tener valores límites máximo y mínimo, δ_{max} y δ_{min} , respectivamente, debe respetar la restricción adicional de que sus cambios pertenezcan a un conjunto finito de valores. Más precisamente,

$$\Delta\delta(k) \triangleq \delta(k) - \delta(k-1) \in \{-\Delta\delta_f, 0, \Delta\delta_f\}. \quad (3)$$

La definición dada en (3) constituye la base de la estrategia propuesta.

La referencia a seguir está compuesta por el estado y la velocidad lineal deseados, respectivamente $\mathbf{x}_r = [\mathbf{p}_r^T, \theta_r]^T$ y v_r . Estas variables se recalculan continuamente a partir de una referencia inicial conformada únicamente por posiciones temporalmente espaciadas por el período de muestreo, \mathbf{p}_r^0 . Esto se explica en detalle en la Subsección III-D. Dicha referencia inicial no necesariamente debe haber sido generada a partir de las ecuaciones del modelo (1) como requieren ciertas estrategias de LMPC [8], [11].

Respecto a la entrada de velocidad lineal v , su valor queda determinado por la referencia. Consideraremos que hay controladores de bajo nivel que pueden seguirla adecuadamente.

III-B. Función de costo

Como se indicó, la entrada de control del sistema no forma parte de la referencia. Por lo tanto, en nuestra función de costo no tendría sentido considerar la diferencia entre entrada aplicada y entrada de referencia como sí se hace en los enfoques de LMPC mencionados [8], [11]. Además, con el objetivo de evitar la necesidad de ajustar parámetros, tampoco se tiene en cuenta la dirección angular δ ni el cambio en la misma. La función de costo solo considera la diferencia entre el estado predicho y el estado de referencia y se expresa de la siguiente manera:

$$J(k) = \sum_{i=1}^{H_p} \left(\left\| \hat{\mathbf{p}}(k+i|k) - \mathbf{p}_r(k+i|k) \right\| + \left| \left(\hat{\theta}(k+i|k) - \theta_r(k+i|k) \right) v_r(k+i|k) \Delta t \right| \right), \quad (4)$$

donde H_p es el horizonte de predicción, el acento circunflejo denota predicciones para los instantes $k+i$ realizadas en el instante k y \mathbf{p}_r , θ_r y v_r son variables de referencia que se recalculan como se explica en la Subsección III-D.

El primer término del costo J corresponde al error en posición, es decir, a la distancia entre la posición predicha y la de referencia. El segundo, representa el error en orientación y se encuentra ponderado por el producto $v_r(k+i|k)\Delta t$. Utilizando este peso, se obtiene una aproximación al error en distancia del instante $k+i+1$ que ocasionaría el error en orientación en $k+i$ asumiendo que $\hat{\mathbf{p}}(k+i|k) \approx \mathbf{p}_r(k+i|k)$.

III-C. Problema de optimización

El problema a resolver en cada instante de muestreo se puede formular del siguiente modo:

$$\begin{aligned} & \underset{\delta}{\text{minimizar}} && J(k) \\ & \text{sujeta a} && \\ & \hat{\mathbf{x}}(k|k) = \tilde{\mathbf{x}}(k), && \\ & \hat{\mathbf{x}}(k+i+1|k) = f(\hat{\mathbf{x}}(k+i|k), \check{\mathbf{u}}(k+i|k), \quad \forall i < H_p, && (5) \\ & \delta(k+i|k) \leq \delta_{max}, && \forall i < H_p, \\ & \delta(k+i|k) \geq \delta_{min}, && \forall i < H_p, \\ & \Delta\delta(k+i|k) \in \{-\Delta\delta_f, 0, \Delta\delta_f\}, && \forall i < H_c, \\ & \Delta\delta(k+i|k) = 0, && \forall i \geq H_c, \end{aligned}$$

donde $i \in \mathbb{N}_0$, la función de costo J es la definida en (4), $\boldsymbol{\delta} = [\delta(k|k), \dots, \delta(k+H_p-1|k)]^T$ es el vector de direcciones angulares de entrada calculadas en k para $k, \dots, k+H_p-1$, $H_c \leq H_p$ es el horizonte de control, $\tilde{\mathbf{x}}(k)$ es el estado actual medido, usado como estado predicho inicial, f es la función definida en (2), utilizada como modelo interno del FCS-MPC, y $\check{\mathbf{u}}(k+i)$ es la entrada del sistema dada por $[v_r(k+i|k), \delta(k+i|k)]^T$. Una vez encontrada la secuencia óptima de direcciones angulares de entrada, $\boldsymbol{\delta}^*$, se aplica al sistema únicamente el primer elemento de la misma ($\delta^*(k|k)$) y se espera al siguiente instante de muestreo para volver a resolver el problema de minimización definido en (5) utilizando las mediciones del instante $k+1$.

El problema así planteado resulta adecuado para aplicar FCS-MPC. El objetivo es hacer una exploración exhaustiva de las posibles evoluciones del estado y del costo asociado con cada una de ellas. Para esto es necesario realizar una cantidad de simulaciones $N = 3^{H_c}$, puesto que 3 es la cardinalidad del conjunto finito de control, como se observa en (3). Esta estrategia de control aplicada a este problema se puede modelar a partir de un árbol ternario. Hay que destacar que abordar la minimización definida en (5) así tiene como ventaja la facilidad con la que se trata un modelo no lineal, en este caso uno con funciones trigonométricas en sus ecuaciones de estado y saturación en la entrada. A su vez, otra ventaja importante está en el potencial de este enfoque para ser implementado utilizando computación paralela.

III-D. Cálculo de la referencia

Idealmente, la función de costo debería penalizar la distancia desde las posiciones predichas hasta los segmentos determinados por los puntos que definen la referencia inicial. Sin embargo, como es muy costoso calcular estas distancias a dichos segmentos para todo el horizonte de predicción con todas las posibles secuencias de control, se propone en cambio recalculan al inicio de cada ciclo de control ciertos puntos de referencia en dichos segmentos y luego evaluar la función de costo a partir de la distancia entre estos puntos y las posiciones predichas para el vehículo.

El primero de estos puntos de referencia recalculados se obtiene como la proyección de la posición actual del robot $\hat{\mathbf{p}}(k|k)$ sobre el segmento de referencia más cercano. Dicho punto, denotado $\mathbf{p}_r(k|k)$, se usa luego para interpolar y

obtener las sucesivas posiciones de referencia recalculadas $\mathbf{p}_r(k+i|k)$ de manera tal que se satisfaga que

$$\frac{\|\mathbf{p}_r(k|k) - \mathbf{p}_r^0(l)\|}{\|\mathbf{p}_r(l+1) - \mathbf{p}_r^0(l)\|} = \frac{\|\mathbf{p}_r(k+i|k) - \mathbf{p}_r^0(l+i)\|}{\|\mathbf{p}_r(l+i+1) - \mathbf{p}_r^0(l+i)\|}, \quad (6)$$

siendo $l \in \mathbb{N}_0$, $i \in \mathbb{N}$, $i \leq H_p$.

El procedimiento se esquematiza en la Figura 2. En gris se encuentran graficadas las posiciones de la referencia inicial y los segmentos definidos por ellas, en línea de trazo. En rojo están las posiciones de referencia recalculadas.

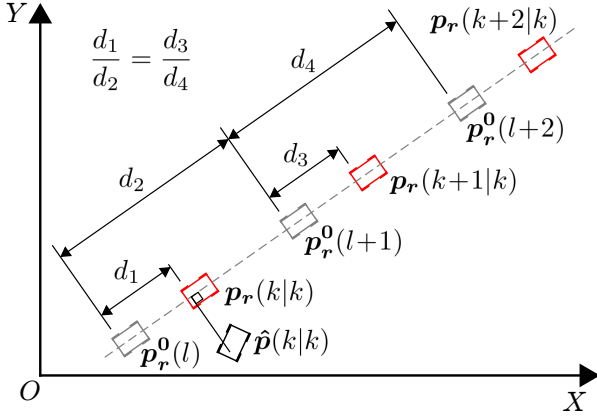


Figura 2. Cálculo de la referencia por proyección e interpolación.

Una vez halladas las nuevas posiciones de referencia, las velocidades lineales de referencia $v_r(k+i|k)$ se pueden determinar a partir del cociente entre la distancia entre $\mathbf{p}_r(k+i|k)$ y $\mathbf{p}_r(k+i+1|k)$, y el período de muestreo. Con respecto a las orientaciones de referencia $\theta_r(k+i|k)$ que también hay que calcular, estas se corresponden con el ángulo del segmento que une las posiciones $\mathbf{p}_r(k+i|k)$ y $\mathbf{p}_r(k+i+1|k)$.

IV. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

IV-A. Configuración

El objetivo de los experimentos realizados fue analizar el desempeño de la técnica propuesta y compararlo con el de las estrategias de LMPC presentadas en [11] y [8], a las que nos referiremos como LMPC-GE (*Global Error*) y LMPC-LE (*Local Error*) respectivamente. Es importante remarcar que dichas técnicas de LMPC probadas, además del ángulo de la dirección, también calculan la entrada de velocidad lineal como variable de control.

Con el fin de que las simulaciones se asemejaran lo más posible a la realidad, se utilizó como planta un modelo dinámico de un robot tipo auto de orden 15, mucho más detallado que (1), que contempla controladores de bajo nivel y deslizamiento entre las ruedas y el suelo. Además, en las mediciones de x y y se adicionó ruido gaussiano de media nula y desviación estándar $\sigma_{xy} \approx 3.2$ cm y en las de θ , lo mismo pero con una desviación estándar $\sigma_\theta \approx 0.039$ rad. De esta manera, se consideró un efecto comparable al del ruido en las mediciones que se obtendrían con un sensor GPS-RTK.

Las trayectorias de referencia usadas para los experimentos fueron cuatro: una línea recta y tres tipos de giro diferentes denominados Ω , Π y T [18]. Todas estas trayectorias, marcadas en línea de trazo negro en la Figura 4, fueron generadas a lazo abierto mediante el modelo definido en (1),

con $\Delta t = 0.2$ s, $L = 1.58$ m y $\delta_{max} = -\delta_{min} = 0.61$ rad. La velocidad lineal se mantuvo en 5 km/h en los tramos rectos y se redujo apropiadamente para los giros.

Los experimentos se realizaron en el entorno de simulación Matlab/Simulink. Para los controladores basados en LMPC se usaron los pesos dados por defecto por Matlab: 1 para los errores en x y en y y 0.1 para el cambio en las entradas Δv y $\Delta \delta$. Las entradas propiamente dichas, v y δ , así como la orientación, θ , no se consideraron en el costo. El tiempo de muestreo fue definido, en todos los casos, igual al usado para generar las trayectorias de referencia, es decir $\Delta t = 0.2$ s. Con respecto a los horizontes H_c y H_p , se realizó un análisis exhaustivo del desempeño de cada una de las estrategias de control para distintas combinaciones de dichos parámetros. Se consideró $H_c \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ y $H_p \in \{9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25\}$. Por último, en relación con las condiciones iniciales utilizadas, estas involucraron un error de 0.1 m en y y 0.175 rad en θ .

IV-B. Resultados

De cada simulación se obtuvo la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) entre las posiciones de las trayectorias de referencia y las de las obtenidas con los controladores MPC. La Figura 3 muestra los mapas de calor de RMSE para el giro T para la estrategia propuesta de FCS-MPC y para el enfoque LMPC-LE. Estos mapas de calor son, en gran medida, representativos de todos los obtenidos para todas las trayectorias estudiadas. La estrategia LMPC-GE demostró un desempeño similar o peor al de LMPC-LE, con inestabilidad en muchos casos, por lo que se optó por no mostrar sus mapas de calor.

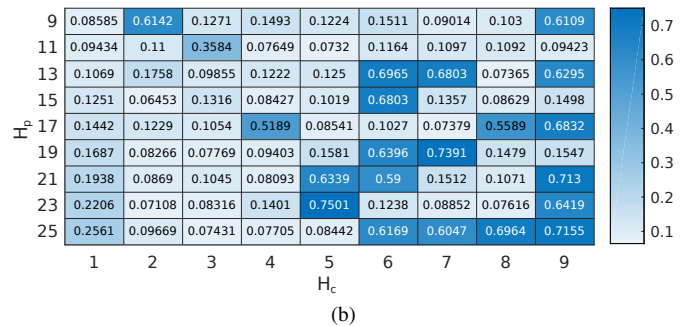
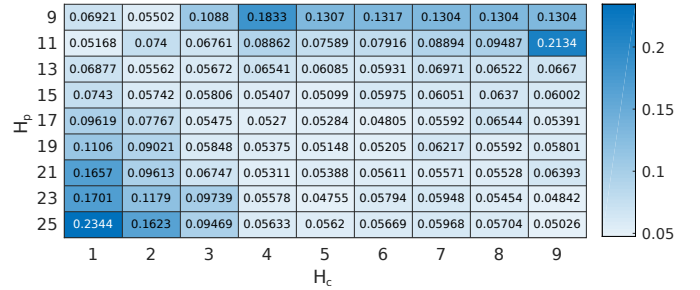


Figura 3. Mapas de calor de la Raíz del Error Cuadrático Medio para el giro T para: (a) FCS-MPC y (b) LMPC-LE.

En la Figura 4 se muestran algunas de las trayectorias con menor RMSE que se obtuvieron, manteniendo los horizontes fijos para cada estrategia. Específicamente, en el caso de LMPC-GE se usó $H_c = 1$ y $H_p = 9$, para LMPC-LE, $H_c = 2$

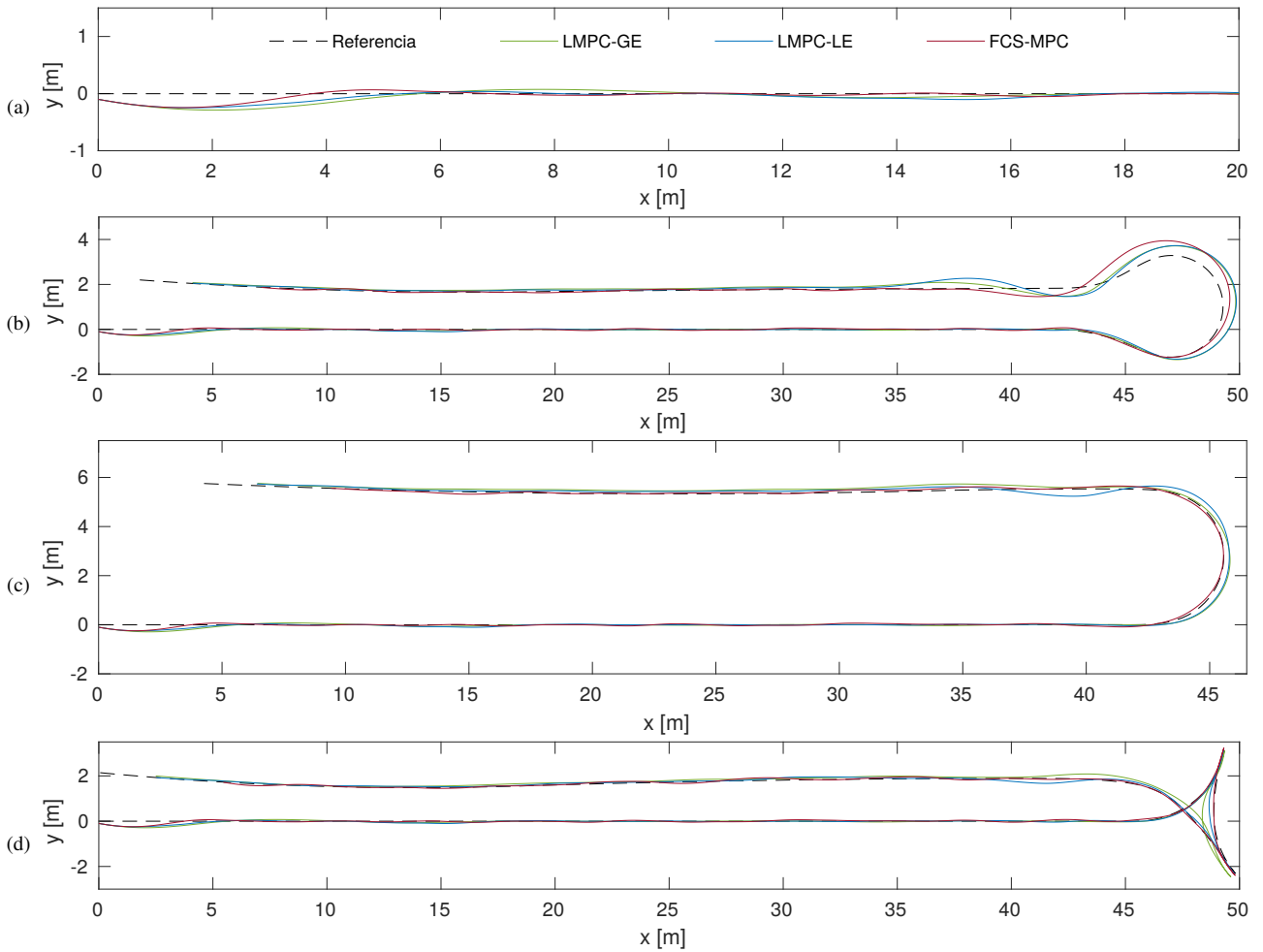


Figura 4. Trayectorias obtenidas: (a) línea recta, (b) giro Ω , (c) giro Π y (d) giro T .

y $H_p = 23$ y para FCS-MPC, $H_c = 5$ y $H_p = 19$. Todas las gráficas utilizan la misma escala en ambos ejes con el fin de representar más fielmente las evoluciones. A su vez, para la trayectoria en línea recta se muestran solo los primeros 20 m de los aproximadamente 80 m que tiene, para que se aprecien mejor los detalles.

IV-C. Análisis de los resultados

Con respecto al desempeño de la estrategia de FCS-MPC, debe decirse que los resultados obtenidos en simulación con dicho esquema de control fueron notoriamente mejores para los giros Π y T que los de los enfoques basados en LMPC. En relación a la trayectoria en línea recta y al giro Ω , se observaron valores de RMSE similares, levemente menores para las estrategias de LMPC. Más allá de esto, algo destacable del estudio realizado es que se notó que tanto con LMPC-GE como con LMPC-LE, los mapas de calor obtenidos muestran una gran sensibilidad a los horizontes H_c y H_p . Las marcadas variaciones en RMSE que se observan sugieren que dichos enfoques no son robustos y que quizás incluso con condiciones iniciales levemente diferentes podrían mostrar desempeños mucho peores a los esperados e incluso volverse inestables, como se observó en varias oportunidades. Esto no ocurre con la estrategia propuesta de FCS-MPC, cuyos mapas de calor tienden a ser mucho más uniformes y previsibles en el sentido de que horizontes más grandes

suelen corresponderse con menor RMSE. Con respecto a la estabilidad de este esquema, solo se apreciaron evoluciones inestables para el giro Ω con $H_p = 9$, es decir el mínimo horizonte de predicción probado.

En relación al tiempo de procesamiento demandado por las estrategias de control analizadas, es importante mencionar que todas demostraron poder ser ejecutadas en tiempo real en una computadora portátil estándar. Puntualmente, la implementación de la estrategia propuesta de FCS-MPC en Matlab, utilizando un único núcleo con instrucciones vectorizadas, permitió simular un tiempo total T_t en aproximadamente un tiempo real de $T_t/2$. Esto se observó para $H_c = 9$ y $H_p = 25$, es decir, el peor caso analizado en términos de carga computacional. Se deduce entonces que una implementación más eficiente, en C/C++, debería permitir funcionamiento en tiempo real con horizontes más extensos. A su vez, la naturaleza paralelizable de la estrategia propuesta sugiere que una implementación en GPU podría aprovechar al máximo los recursos de dicho *hardware*.

Comparando más genéricamente la propuesta de este trabajo con enfoques más tradicionales de MPC, lo primero que se hace notar de la estrategia de FCS-MPC para seguimiento de camino es la simplicidad con la que se resuelve el problema de optimización planteado. Dicha simplicidad, que surge de sacrificar parcialmente la resolución en el movimiento de la dirección, hace que su implementación sea considerablemente

más sencilla que otras que requieren de métodos basados en *Interior Point* o *Active Set*.

Otro aspecto favorable de la estrategia propuesta de FCS-MPC es que no requiere ajustar ningún coeficiente de ponderación en su función de costo. Los únicos parámetros factibles de ser modificados son el H_c y el H_p , y la respuesta del controlador frente a ajustes en los mismos es razonablemente intuitiva, en contraposición a lo visto para LMPC.

Es importante también destacar la facilidad con la que se tratan modelos no lineales con la estrategia propuesta. En particular, esto facilita la incorporación de restricciones en las entradas y los estados, que si bien es algo que se asume integrado en toda formulación de MPC, para los enfoques de LMPC estudiados no era simple de hacer dado que se hacen cambios de variable que transforman las restricciones en inecuaciones (no lineales para el caso de LMPC-LE) que varían con la evolución de los estados y las entradas. Dependiendo de la herramienta o librería que se utilice para resolver el problema de MPC, esto puede ser o no un problema considerable.

Por último, en relación a las referencias que requieren las estrategias probadas, hay que mencionar que la propuesta de FCS-MPC es mucho menos exigente. Mientras que con LMPC es necesario conocer el estado y las entradas de referencia para cada instante de muestreo, con la estrategia propuesta, en principio solo sería necesario disponer parcialmente del estado de referencia, en particular de las posiciones. La velocidad lineal y la orientación podrían deducirse mientras que el ángulo de la dirección se calcula en el control. Esto provee una mayor flexibilidad al enfoque propuesto, principalmente pensando en el caso no considerado en este trabajo de que sea necesario recalcularse la trayectoria de referencia, por ejemplo, por la aparición de obstáculos.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso una estrategia de MPC para seguimiento de camino de robots tipo auto basada en FCS-MPC, que es un esquema de control usado típicamente en convertidores electrónicos de potencia, es decir en un problema completamente diferente.

El enfoque propuesto, caracterizado por ser simple e inherentemente paralelizable, se basa en explotar características que naturalmente suelen tener los robots tipo auto en relación a cómo actúan sobre la dirección. Esto deriva en un conjunto finito y reducido de posibles acciones de control en cada instante de muestreo. La propuesta entonces se basa en hacer una exploración exhaustiva de las posibles secuencias de control, simulando el comportamiento del robot para cada una y seleccionando la más adecuada según la función de costo definida como parte de la estrategia. Se desarrolló además un procedimiento para ajustar la referencia inicial, disponible *a priori*.

Luego, se comparó la propuesta contra otras estrategias basadas en MPC orientadas a seguimiento de trayectoria. Se presentaron las ventajas del enfoque desarrollado, entre las cuales se destaca un gran desempeño en términos de RMSE, mayor robustez y facilidad en el ajuste de los horizontes de predicción y control, que son los únicos parámetros del controlador.

Como trabajo futuro, se plantea la implementación de la estrategia propuesta en una GPU y la realización de pruebas experimentales sobre una plataforma robótica real.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo, enmarcado en el proyecto de desarrollo de un robot desmalezador del CIFASIS (CONICET-UNR), fue parcialmente financiado por el CONICET (PUE 0015-2016).

REFERENCIAS

- [1] T. Pire, M. Mujica, J. Civera, and E. Kofman, "The Rosario dataset: Multisensor data for localization and mapping in agricultural environments," *International Journal of Robotics Research*, pp. 1–9, 2019.
- [2] T. Bak and H. Jakobsen, "Agricultural Robotic Platform with Four Wheel Steering for Weed Detection," *Biosystems Engineering*, vol. 87, no. 2, pp. 125–136, 2004.
- [3] A. Ruckelshausen, P. Biber, M. Dorna, H. Gremmes, R. Klose, A. Linz, F. Rahe, R. Resch, M. Thiel, D. Trautz, and U. Weiss, "BoniRob: an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping," *Precision Agriculture*, vol. 9, no. 841, p. 1, 2009.
- [4] J. M. Maciejowski, *Predictive Control with Constraints*. Pearson Education, 2002.
- [5] B. Paden, M. Čáp, S. Z. Yong, D. Yershov, and E. Frazzoli, "A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 33–55, 2016.
- [6] Q. Yao, Y. Tian, Q. Wang, and S. Wang, "Control Strategies on Path Tracking for Autonomous Vehicle: State of the Art and Future Challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 161 211–161 222, 2020.
- [7] J. Rodriguez, M. P. Kazmierkowski, J. R. Espinoza, P. Zanchetta, H. Abu-Rub, H. A. Young, and C. A. Rojas, "State of the Art of Finite Control Set Model Predictive Control in Power Electronics," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 2, pp. 1003–1016, 2013.
- [8] G. Klančar and I. Škrjanc, "Tracking-error model-based predictive control for mobile robots in real time," *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 460–469, 2007.
- [9] I. Maurović, M. Baotić, and I. Petrović, "Explicit Model Predictive Control for Trajectory Tracking with Mobile Robots," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2011, pp. 712–717.
- [10] A. Bemporad, M. Morari, V. Dua, and E. N. Pistikopoulos, "The explicit linear quadratic regulator for constrained systems," *Automatica*, vol. 38, no. 1, pp. 3–20, 2002.
- [11] F. Kühne, J. M. Gomes da Silva Jr., and W. Fetter Lages, "Mobile Robot Trajectory Tracking Using Model Predictive Control," in *IEEE Latin American Robotics Symposium (LARS)*, vol. 51, 2005.
- [12] D.-K. Phung, B. Hérisse, J. Marzat, and S. Bertrand, "Model Predictive Control for Autonomous Navigation Using Embedded Graphics Processing Unit," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 11 883–11 888, 2017.
- [13] Y. Ding, L. Wang, Y. Li, and D. Li, "Model predictive control and its application in agriculture: A review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 151, pp. 104–117, 2018.
- [14] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou, and P. Martinet, "High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding: Application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks," *Autonomous Robots*, vol. 21, no. 1, pp. 79–97, 2006.
- [15] E. Kayacan, E. Kayacan, H. Ramon, and W. Saeys, "Towards agrobots: Identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 115, pp. 78–87, 2015.
- [16] J. Backman, T. Oksanen, and A. Visala, "Navigation system for agricultural machines: Nonlinear Model Predictive path tracking," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 82, pp. 32–43, 2012.
- [17] E. Kayacan, H. Ramon, and W. Saeys, "Robust Trajectory Tracking Error Model-Based Predictive Control for Unmanned Ground Vehicles," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 2, pp. 806–814, 2016.
- [18] I. Ait, T. Pire, and E. Kofman, "Revisión de Métodos de Planificación de Camino de Cobertura para Entornos Agrícolas," in *Jornadas Argentinas de Robótica (JAR)*, 2019, pp. 1–6.