

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE ED ELETTRICA E
MATEMATICA APPLICATA**



Report Digital Control Systems Design

Controllo di un motore DC con retroazione di stato

Francesco Avallone - 0622701488 - f.avallone20@studenti.unisa.it

Lorenzo Pagliara - 0622701576 - l.pagliara5@studenti.unisa.it

Anno accademico 2021 - 2022

Indice

1	Formulazione del problema di controllo ad alto livello	2
2	Modello matematico	2
2.1	Modello matematico per controllo in posizione	2
2.2	Modello matematico per controllo in velocità	3
3	Tecniche di controllo	3
4	Risultati ottenuti e discussione delle performance	3
4.1	Risultati con controllo in posizione	4
4.2	Risultati con controllo in velocità	4
A	Simulazioni	5
A.1	Controllo in posizione	5
A.2	Controllo in velocità	9

1 Formulazione del problema di controllo ad alto livello

I motori DC, oggi, trovano largo impiego in diverse applicazioni tecnologiche, in particolare nell'ambito della robotica ove sono utilizzati per movimentare le parti mobili, siano esse ruote di locomozione o giunti di bracci meccanici. In questo contesto svolge un ruolo significativo effettuare il controllo per poter assegnare una posizione o una velocità desiderata.

In questo elaborato sono stati sviluppati entrambi gli approcci di controllo, ovvero:

- controllo in posizione;
- controllo in velocità.

Per ambedue gli approcci è stata utilizzata la tecnica di controllo avanzata della *retroazione di stato*, a partire da modelli matematici differenti dello stesso processo atti a conseguire il controllo con gli approcci su citati.

2 Modello matematico

2.1 Modello matematico per controllo in posizione

Il modello matematico del motore DC nella forma dello spazio di stato, ottenuto a partire dalle equazioni elettriche e meccaniche del motore DC, è il seguente sistema del secondo ordine in cui le variabili di stato sono la posizione angolare θ e la velocità angolare ω :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_m}{\tau_m} \end{bmatrix} v \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

L'ingresso di controllo di tale sistema è la tensione applicata al motore v , compresa tra 0V e 12V, e l'uscita è la posizione angolare θ , espressa in radianti.

R	3.2Ω
L	$8.2mH$
K_e	$0.85Vs/rad$
K_t	$0.85Nm/A$
b	$0.016Nms/rad$
I	$0.0059Nms^2/rad$

Tabella 1: Parametri del motore in dotazione.

Considerando i parametri del motore in dotazione in Tabella 1, si ottiene il seguente modello nello spazio di stato:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -38.27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 45.02 \end{bmatrix} u \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 Modello matematico per controllo in velocità

Analogamente, applicando la trasformata di Laplace alle equazioni del motore e moltiplicando il numeratore per 9.5493, è stata ottenuta la funzione di trasferimento del motore DC, in cui l'ingresso di controllo è la tensione fornita al motore v e l'uscita è la velocità angolare ω , espressa in RPM:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{9.5493k}{(sL + R)(sI + b) + k^2} \quad (3)$$

Considerando i parametri del motore in dotazione in tabella 1, si ottiene la seguente funzione di trasferimento:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{v(s)} = \frac{167773.98}{s^2 + 392.96s + 15992.15} \quad (4)$$

3 Tecniche di controllo

Per entrambi gli approcci di controllo (posizione e velocità) è stata utilizzata la tecnica della *retroazione di stato*. Il punto di partenza per l'applicazione di tale tecnica è l'ottenimento di una rappresentazione nello spazio di stato. Per il caso del controllo in posizione il modello di partenza già rispettava tale requisito, mentre per il controllo in velocità è stato necessario effettuare la realizzazione della funzione di trasferimento.

Ottenute entrambe le rappresentazioni nello spazio di stato, il primo passo effettuato è stato quello di verificarne la raggiungibilità e l'osservabilità. Accertatosi che entrambe verificassero tali requisiti, si è poi proceduto con l'estendere i modelli con uno stato fittizio, rappresentante l'integrale dell'errore, per la reiezione di disturbi costanti. Al fine di ottenere una legge di controllo discreta, tali rappresentazioni estese sono poi state convertite in modelli nello spazio di stato a tempo discreto. Quest'ultimi, infine, sono stati poi utilizzati per la progettazione di un controllore feedback state, i cui guadagni sono stati ottenuti mediante LQR.

Data la non osservabilità della velocità angolare, nel caso del controllo in posizione, e della corrente, nel caso del controllo in velocità, è stato realizzato un osservatore di Luenberger, anch'esso ottenuto mediante la tecnica dell'LQR.

Per una visione più completa riguardo i passi progettuali seguiti, si rimanda al codice MATLAB, considerato parte integrante di questo documento.

Controllo in velocità, Controllo in posizione

Gli stessi approcci di controllo sono poi stati implementati utilizzando la tecnica del *direct coding*, di cui di seguito sono riportati i link ai file sorgenti.

Controllo in posizione direct coding, Controllo in velocità direct coding

4 Risultati ottenuti e discussione delle performance

Sia per il controllo in posizione che per il controllo in velocità, è stato seguito il modello di sviluppo model based a V che prevede una fase di testing ad ogni step di sviluppo. In particolare sono stati effettuati i task di validazione:

1. Model in the Loop (MIL);

2. Software in the Loop (SIL);
3. Processor in the Loop (PIL);
4. Test sul processo reale;

È doveroso sottolineare che la fase di test sul processo reale deve essere preceduta dalla fase Hardware in the Loop (HIL), la quale non è stata effettuata per via dell'indisponibilità dell'opportuna strumentazione.

4.1 Risultati con controllo in posizione

Per le simulazioni del controllo in posizione sono stati utilizzati i seguenti riferimenti: 0 , -2π , π , 2π , 0 , aggiornati ogni $2s$ mediante uno Stateflow chart.

Dalle diverse simulazioni corrispondenti ai diversi task di validazione si può notare che la risposta del sistema resta pressoché invariata, con tempi di assestamento inferiori al secondo e un comportamento abbastanza privo di sovra-elongazione. I picchi un po' più rilevanti si ottengono quando il riferimento cambia in modulo di un valore almeno pari a 2π . Tale comportamento dipende dalla presenza dell'azione integrale, che in assenza di uno schema anti windup, con errori più grandi fa saturare l'ingresso di controllo al limite dell'attuatore.

Nelle Figure 1, 2, 4 sono riportate rispettivamente le risposte del motore nella fase di validazione MIL, SIL, PIL. Inoltre, nelle Figure 3 e 5 sono riportati rispettivamente i tempi di esecuzione relativi alla validazione SIL e PIL. Come lecito aspettarsi, la validazione SIL ha richiesto tempi notevolmente inferiori a quella PIL.

Un'attenzione particolare va rivolta all'esecuzione dell'algoritmo di controllo sul motore fisico. Le risposte rispettivamente dell'algoritmo auto generato e di quello ottenuto mediante direct coding sono riportate in Figura 6 e in Figura 7. Dalle figure si può notare che la risposta del motore ha un comportamento leggermente oscillatorio attorno al valore del riferimento. Ciò dipende dalla risoluzione fisica del motore che non consente di ottenere una posizione angolare perfettamente coincidente con il riferimento.

4.2 Risultati con controllo in velocità

Per le simulazioni del controllo in velocità sono stati utilizzati i seguenti riferimenti: 0 , 80 , 125 , 0 , -80 , -125 , aggiornati ogni $2s$ mediante uno Stateflow chart.

Anche in questo caso nelle simulazioni corrispondenti ai diversi task di validazione la risposta del sistema resta pressoché invariata, con tempi di assestamento di circa mezzo secondo e un comportamento totalmente privo di sovra-elongazione.

Nelle Figure 8, 9, 11 sono riportate rispettivamente le risposte del motore nella fase di validazione MIL, SIL, PIL. Inoltre, nelle Figure 10 e 12 sono riportati rispettivamente i tempi di esecuzione relativi alla validazione SIL e PIL. Come lecito aspettarsi anche in questo, la validazione SIL ha richiesto tempi notevolmente inferiori a quella PIL.

Un'attenzione particolare va rivolta all'esecuzione dell'algoritmo di controllo sul motore fisico. Le risposte rispettivamente dell'algoritmo auto generato e di quello ottenuto mediante direct coding sono riportate in Figura 13 e in Figura 14. Dalle figure si può notare che la risposta del motore ha dei picchi continui dovuti all'errore della stima della velocità a causa della perdita di ticks dell'encoder.

A Simulazioni

A.1 Controllo in posizione

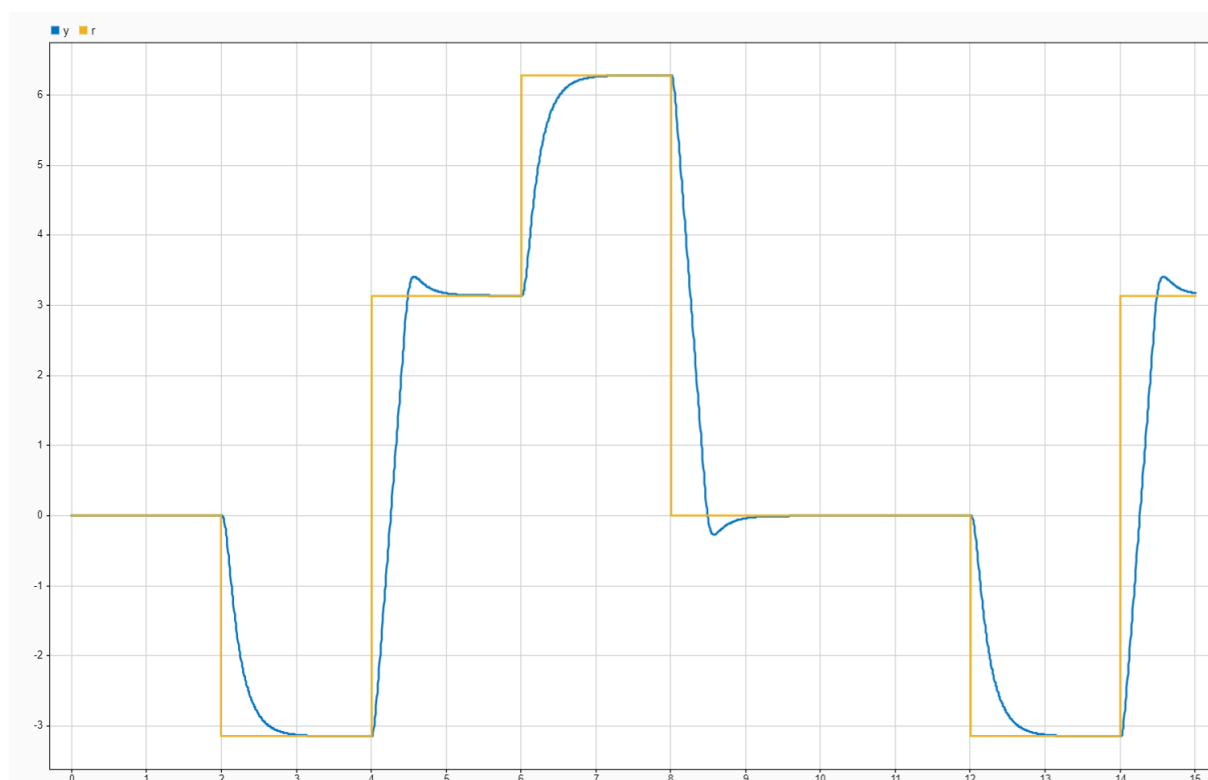


Figura 1: Simulazione MIL del controllo di posizione.

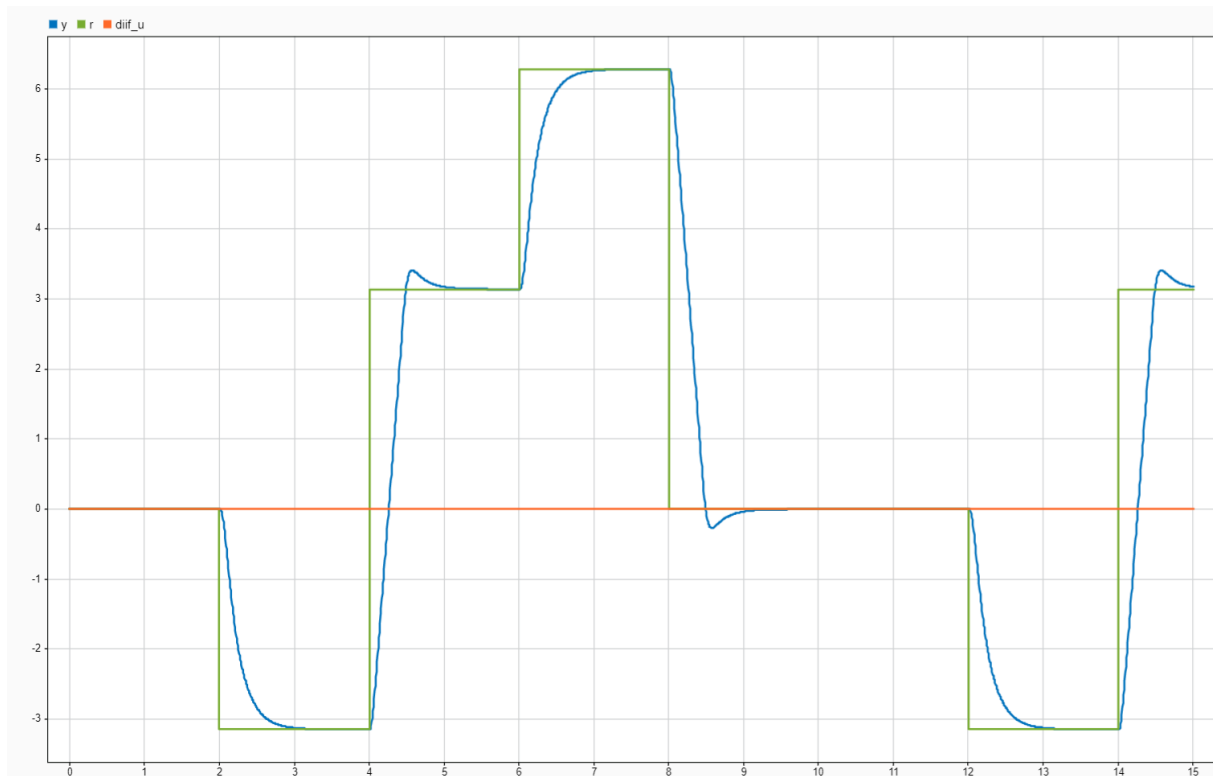


Figura 2: Simulazione SIL del controllo di posizione.

Code Execution Profiling Report for Position_State_Feedback_SIL_Simulation/State Feedback Controller (SIL)

The code execution profiling report provides metrics based on data collected from a SIL or PIL execution. Execution times are calculated from data recorded by instrumentation probes added to the SIL or PIL test harness or inside the code generated for each component. See [Code Execution Profiling](#) for more information.

1. Summary

Total time	388678
Unit of time	ns
Command	report(executionProfile, 'Units', 'seconds', 'ScaleFactor', '1e-09', 'NumericFormat', '%0.0F');
Timer frequency (ticks per second)	2.901e+09
Profiling data created	28-May-2022 15:01:10

2. Profiled Sections of Code

Section	Maximum Execution Time in ns	Average Execution Time in ns	Maximum Self Time in ns	Average Self Time in ns	Calls
Controller_Observer_initialize	7427	7427	7427	7427	1
Controller_Observer_Model_Init	34	34	34	34	1
Controller_Observer_Model [0.005 0]	80637	127	80637	127	3001

3. CPU Utilization [\[hide\]](#)

Task	Average CPU Utilization	Maximum CPU Utilization
Controller_Observer_Model [0.005 0]	0.002541%	1.613%
Overall CPU Utilization	0.002541%	1.613%

Figura 3: Tempi di esecuzione della simulazione SIL del controllo di posizione.

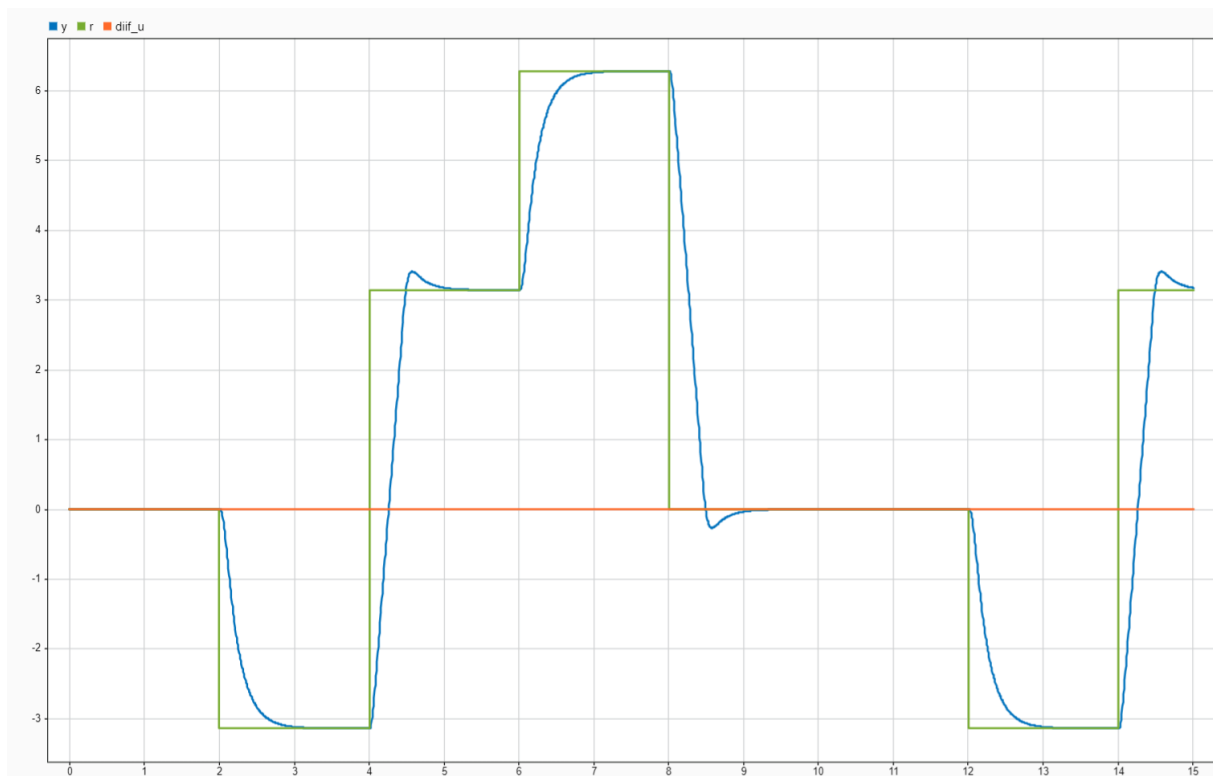


Figura 4: Simulazione PIL del controllo di posizione.

Code Execution Profiling Report for Position_State_Feedback_PIL_Simulation/State Feedback Controller (PIL)

The code execution profiling report provides metrics based on data collected from a SIL or PIL execution. Execution times are calculated from data recorded by instrumentation probes added to the SIL or PIL test harness or inside the code generated for each component. See [Code Execution Profiling](#) for more information.

1. Summary

Total time	78735952
Unit of time	ns
Command	report(executionProfile, 'Units', 'seconds', 'ScaleFactor', '1e-09', 'NumericFormat', '%0.0f');
Timer frequency (ticks per second)	8.4e+07
Profiling data created	28-May-2022 09:55:10

2. Profiled Sections of Code

Section	Maximum Execution Time in ns	Average Execution Time in ns	Maximum Self Time in ns	Average Self Time in ns	Calls
Controller_Observer_initialize	1500	1500	1500	1500	1
Controller_Observer_Model_Init	1738	1738	1738	1738	1
Controller_Observer_Model [0.005 0]	27893	26235	27893	26235	3001

3. CPU Utilization [\[hide\]](#)

Task	Average CPU Utilization	Maximum CPU Utilization
Controller_Observer_Model [0.005 0]	0.5247%	0.5579%
Overall CPU Utilization	0.5247%	0.5579%

Figura 5: Tempi di esecuzione della simulazione PIL del controllo di posizione.

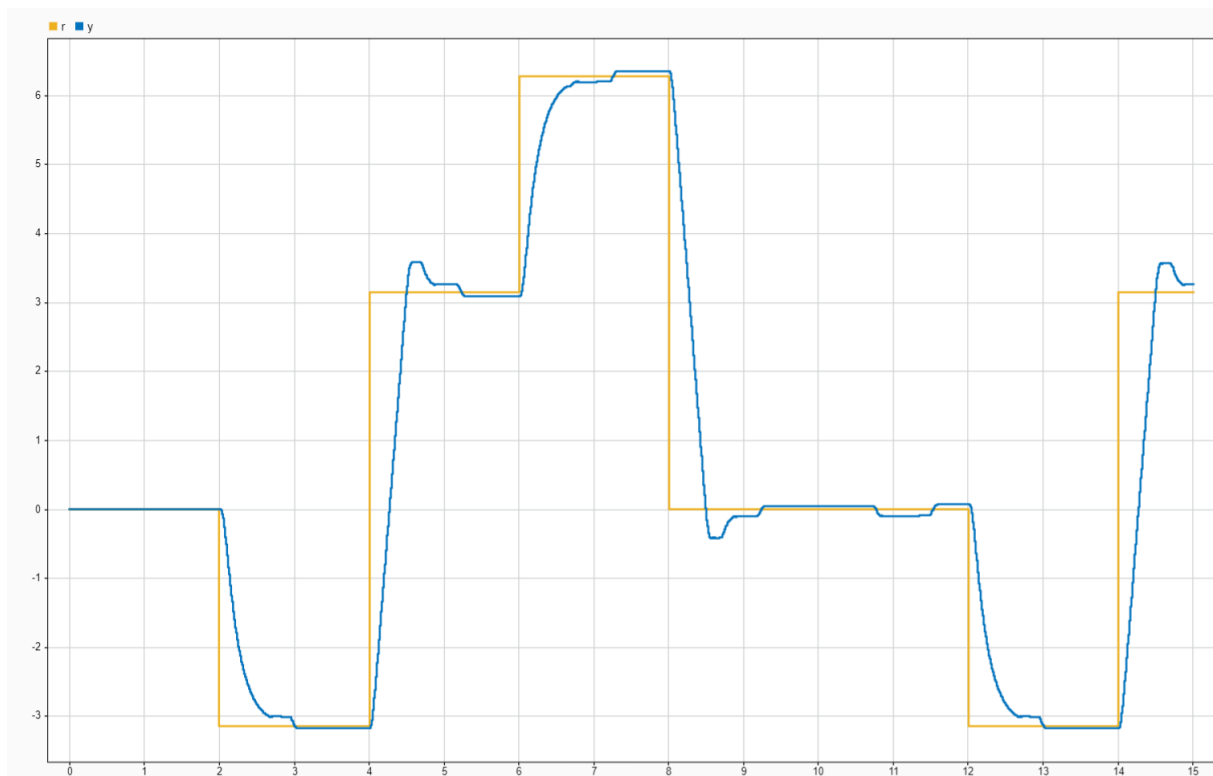


Figura 6: Esecuzione sul motore fisico del controllo di posizione, mediante auto generazione del codice.

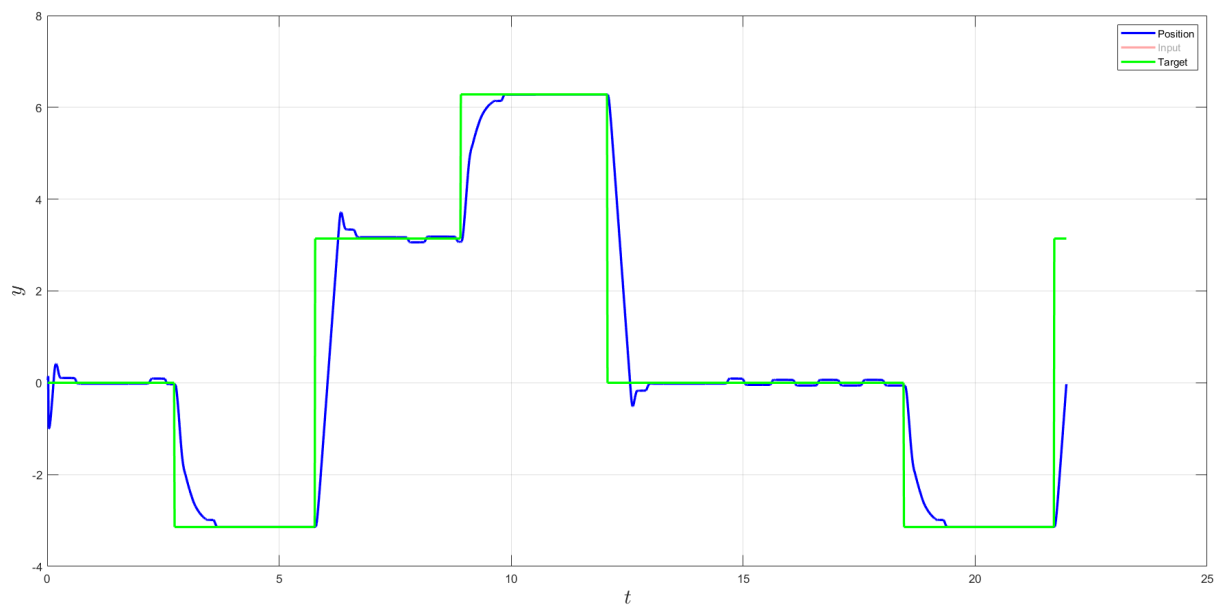


Figura 7: Esecuzione sul motore fisico del controllo di posizione, mediante la tecnica del direct coding.

A.2 Controllo in velocità

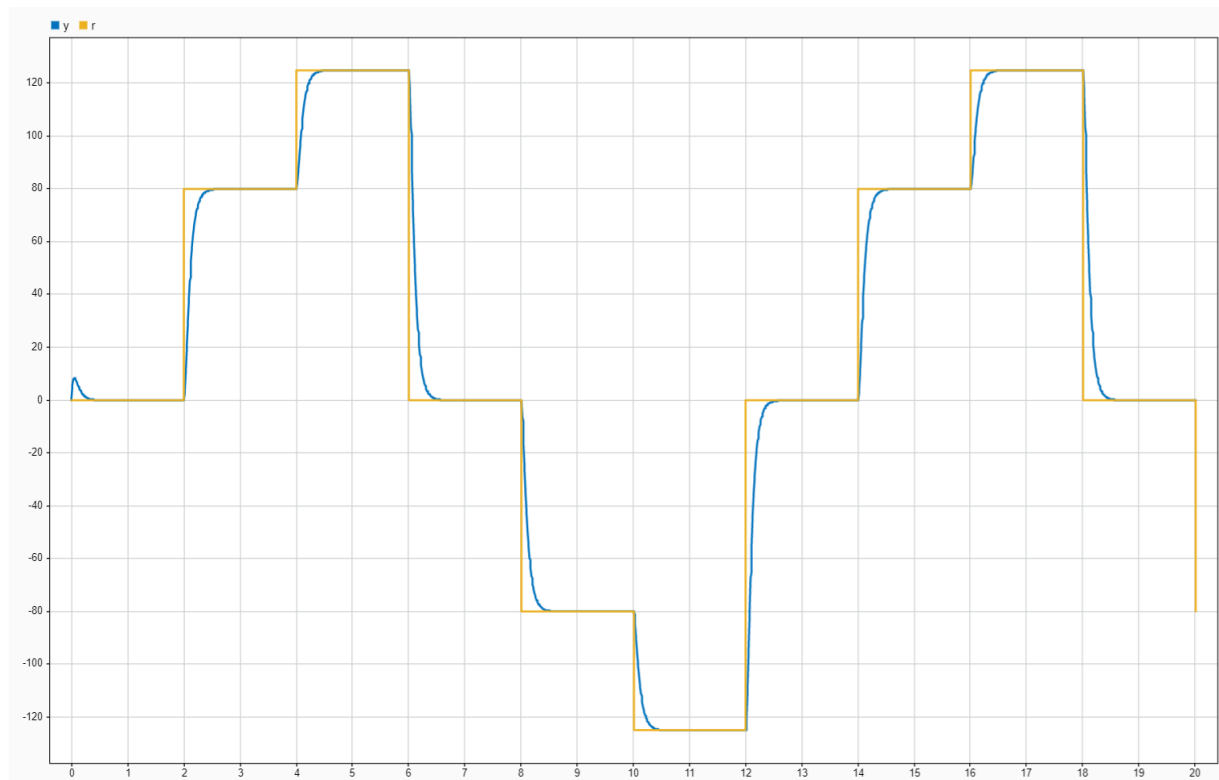


Figura 8: Simulazione MIL del controllo di velocità.

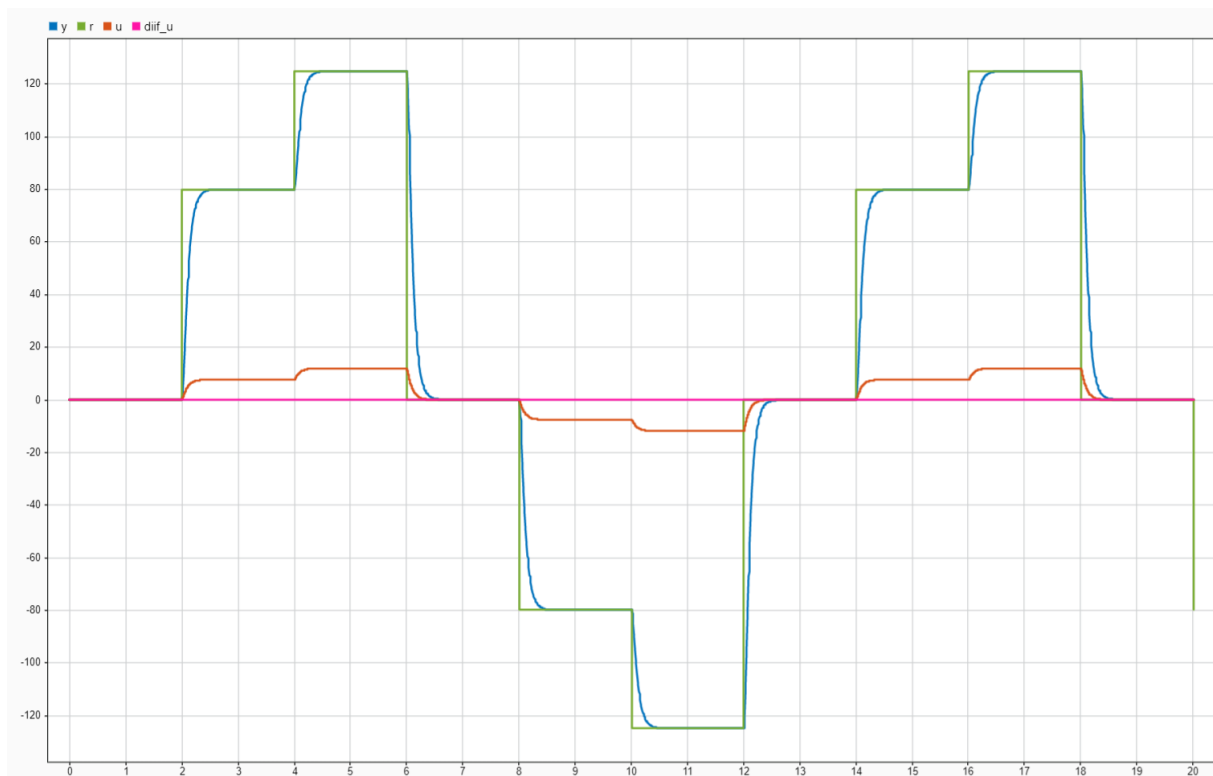


Figura 9: Simulazione SIL del controllo di velocità.

Code Execution Profiling Report for Speed_State_Feedback_SIL_Simulation/State Feedback Controller (SIL)

The code execution profiling report provides metrics based on data collected from a SIL or PIL execution. Execution times are calculated from data recorded by instrumentation probes added to the SIL or PIL test harness or inside the code generated for each component. See [Code Execution Profiling](#) for more information.

1. Summary

Total time	449037
Unit of time	ns
Command	report(executionProfile, 'Units', 'seconds', 'ScaleFactor', '1e-09', 'NumericFormat', '%0.0f');
Timer frequency (ticks per second)	2.901e+09
Profiling data created	28-May-2022 15:08:11

2. Profiled Sections of Code

Section	Maximum Execution Time in ns	Average Execution Time in ns	Maximum Self Time in ns	Average Self Time in ns	Calls
Controller_Observer_initialize	26182	26182	26182	26182	1
Controller_Observer_Model_Init	18	18	18	18	1
Controller_Observer_Model [0.005 0]	9215	106	9215	106	4001

3. CPU Utilization [\[hide\]](#)

Task	Average CPU Utilization	Maximum CPU Utilization
Controller_Observer_Model [0.005 0]	0.002114%	0.1843%
Overall CPU Utilization	0.002114%	0.1843%

Figura 10: Tempi di esecuzione della simulazione SIL del controllo di velocità.

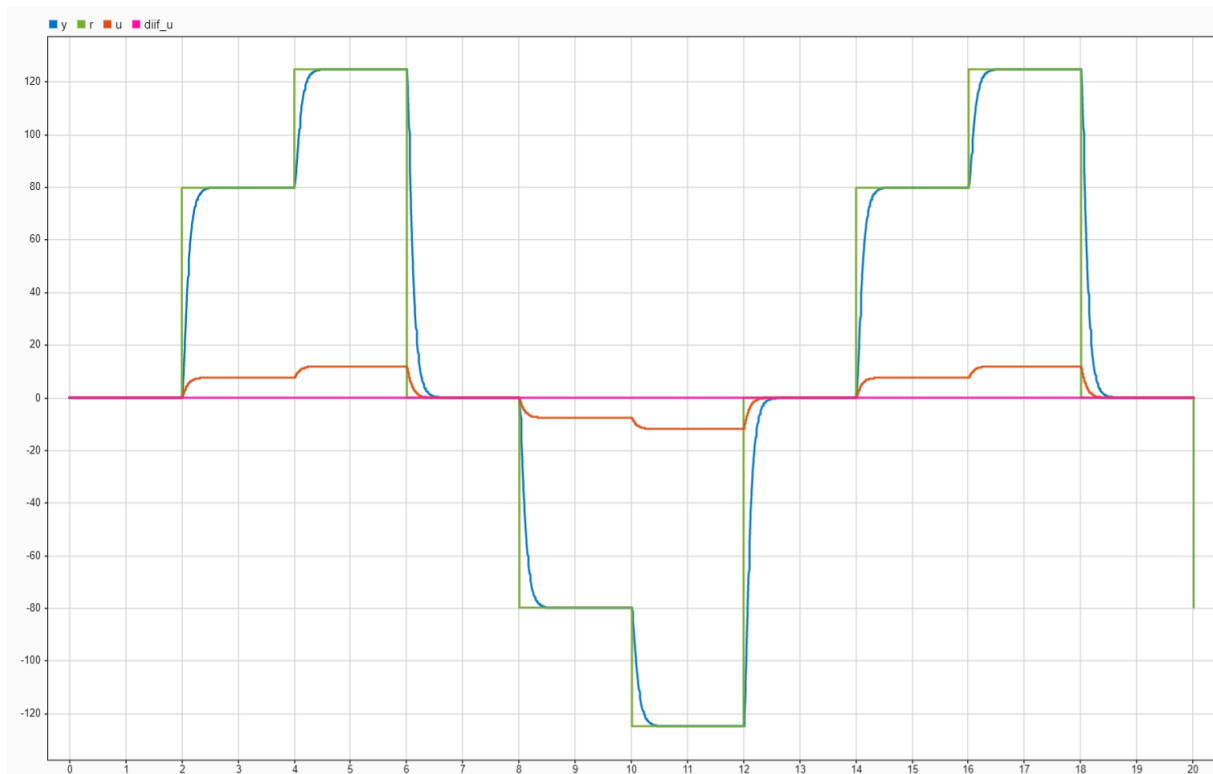


Figura 11: Simulazione PIL del controllo di velocità.

Code Execution Profiling Report for Speed_State_Feedback_PIL_Simulation/State Feedback Controller (PIL)

The code execution profiling report provides metrics based on data collected from a SIL or PIL execution. Execution times are calculated from data recorded by instrumentation probes added to the SIL or PIL test harness or inside the code generated for each component. See [Code Execution Profiling](#) for more information.

1. Summary

Total time	112392690
Unit of time	ns
Command	report(executionProfile, 'Units', 'seconds', 'ScaleFactor', '1e-09', 'NumericFormat', '%0.0f');
Timer frequency (ticks per second)	8.4e+07
Profiling data created	28-May-2022 10:28:04

2. Profiled Sections of Code

Section	Maximum Execution Time in ns	Average Execution Time in ns	Maximum Self Time in ns	Average Self Time in ns	Calls
Controller_Observer_initialize	1500	1500	1500	1500	1
Controller_Observer_Model_Init	1738	1738	1738	1738	1
Controller_Observer_Model [0.005 0]	29524	28090	29524	28090	4001

3. CPU Utilization [\[hide\]](#)

Task	Average CPU Utilization	Maximum CPU Utilization
Controller_Observer_Model [0.005 0]	0.5618%	0.5905%
Overall CPU Utilization	0.5618%	0.5905%

Figura 12: Tempi di esecuzione della simulazione PIL del controllo di velocità.

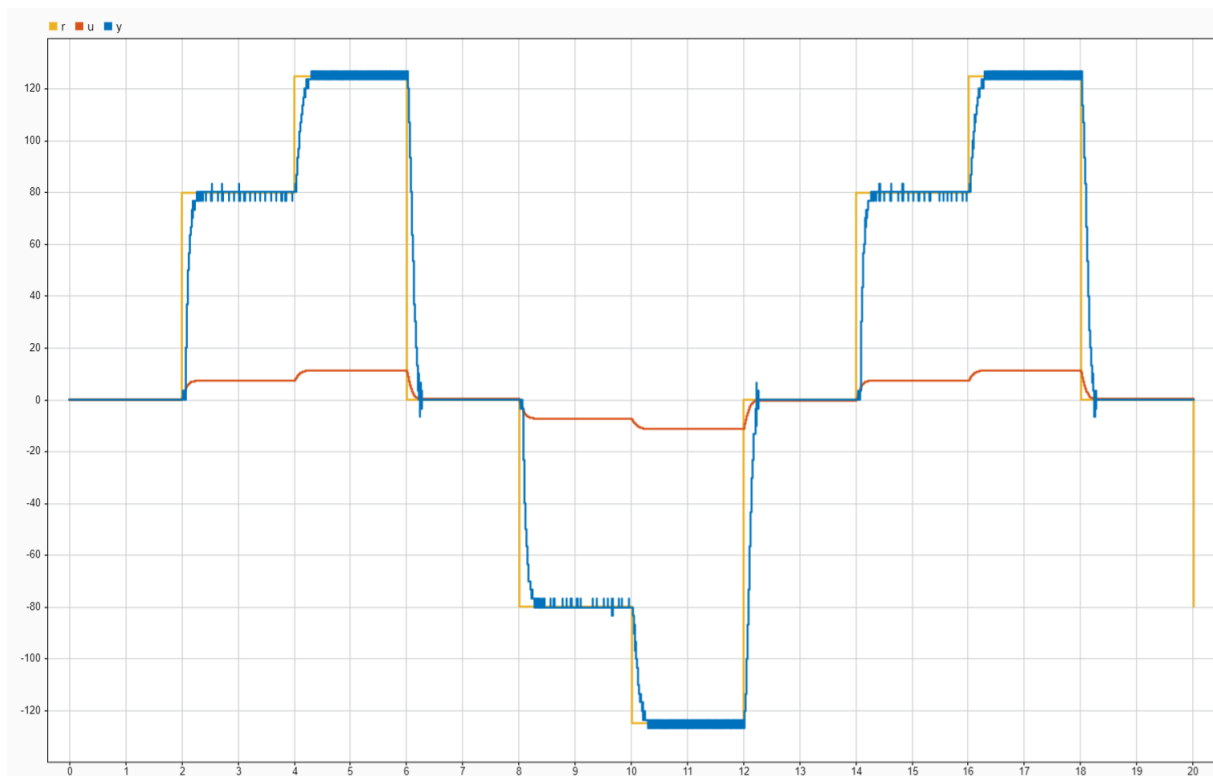


Figura 13: Esecuzione sul motore fisico del controllo di velocità, mediante auto generazione del codice.

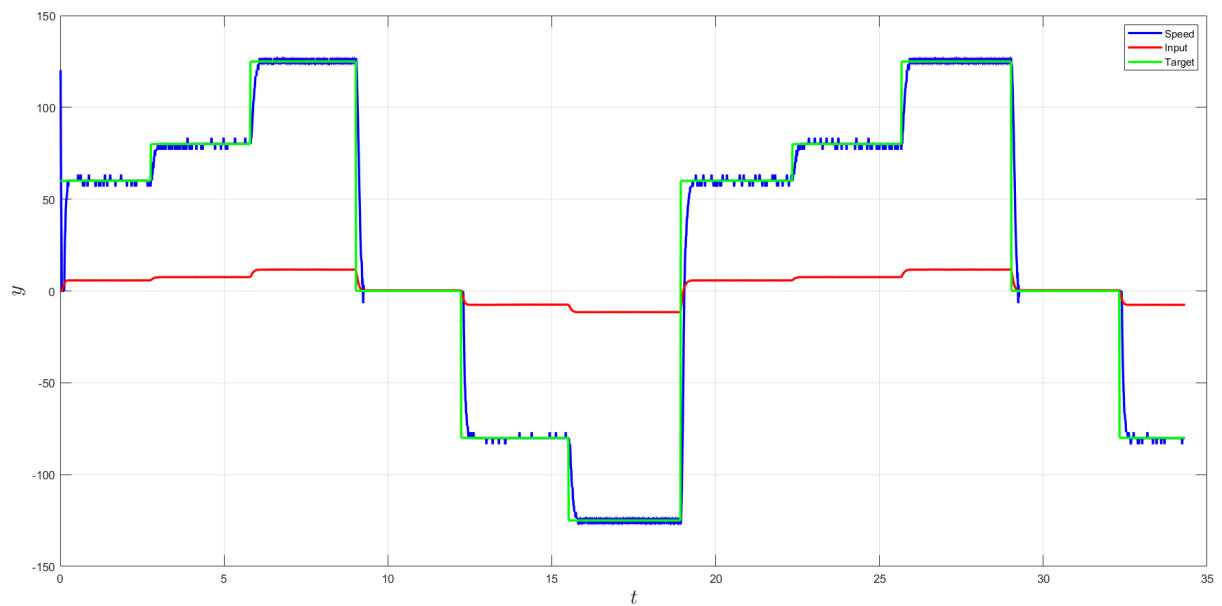


Figura 14: Esecuzione sul motore fisico del controllo di velocità, mediante la tecnica del direct coding.