UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DOTTORATO DI RICERCA IN MECCANICA APPLICATA, XIX CICLO.
ANNO ACCADEMICO 2004/2005

Tecniche di controllo di forza di tipo "Non Time Based"

Dottorando: Paolo Pascutto[1]

Tutore: prof. Aldo Rossi[2]
Co-turore: prof. Paolo Gallina[1]

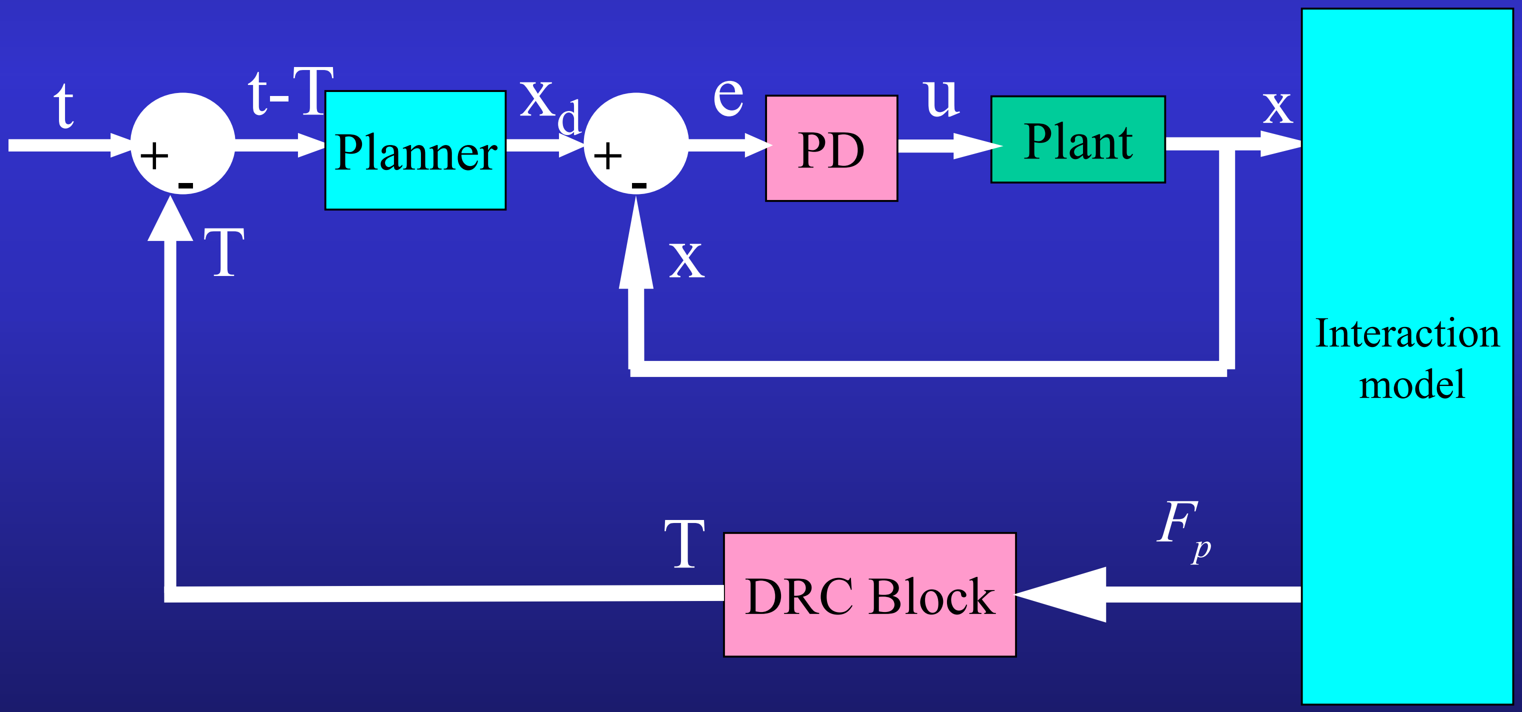
[1] Dip. di Ingegneria Meccanica, Università di Trieste, Via A. Valerio 10 - 34127, TS;
pgallina@units.it Tel: +39 (040) 558 2540.
pascutto@libero.it

[2] Dip. di Innovazione Meccanica e Gestionale, Università di Padova

Attività precedenti

DRC: $x_d = x_d(l) = x_d(t-T)$

$$T = \int_0^t \alpha\, F_c(t)\, dt$$ α **influenza forza di equilibrio**

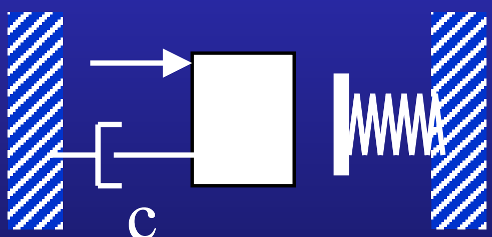


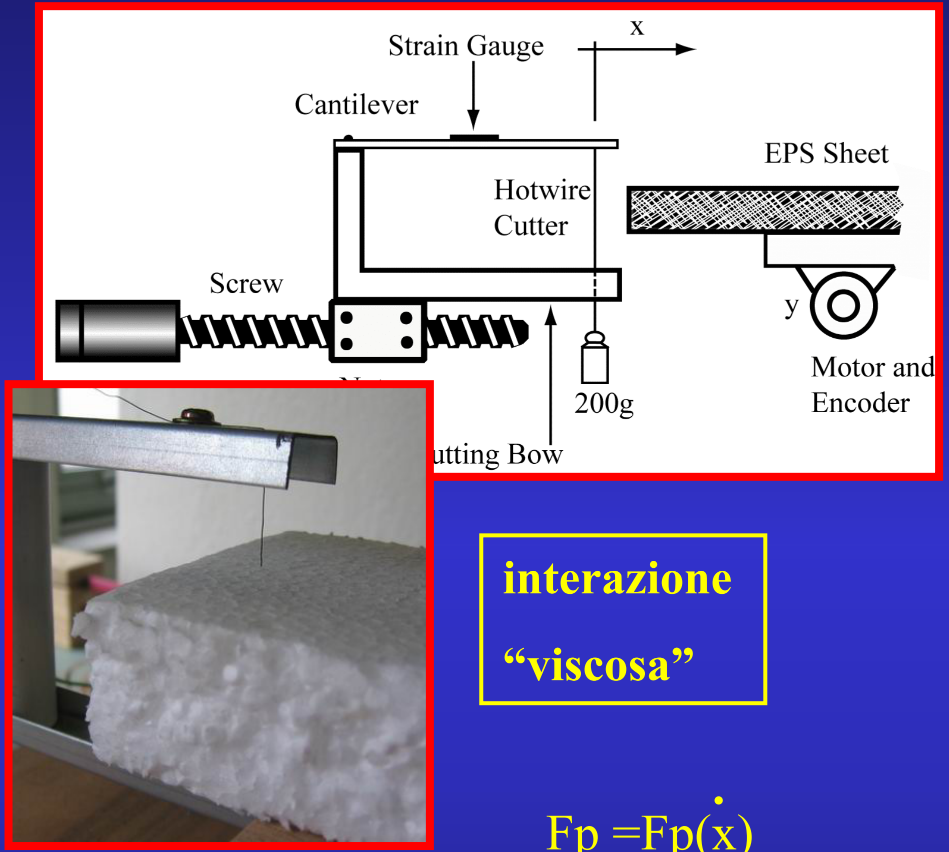
Attività precedenti

interazione

“elastica”

$Fc = Fc(x)$

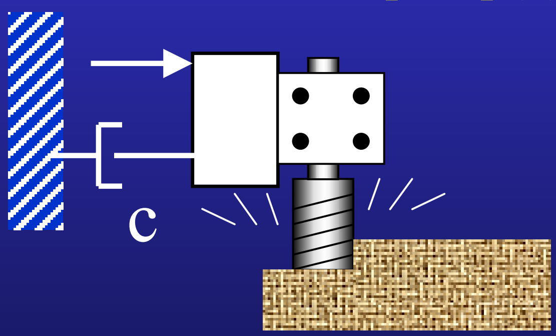




interazione

“viscosa”

$Fp = Fp(\dot{x})$



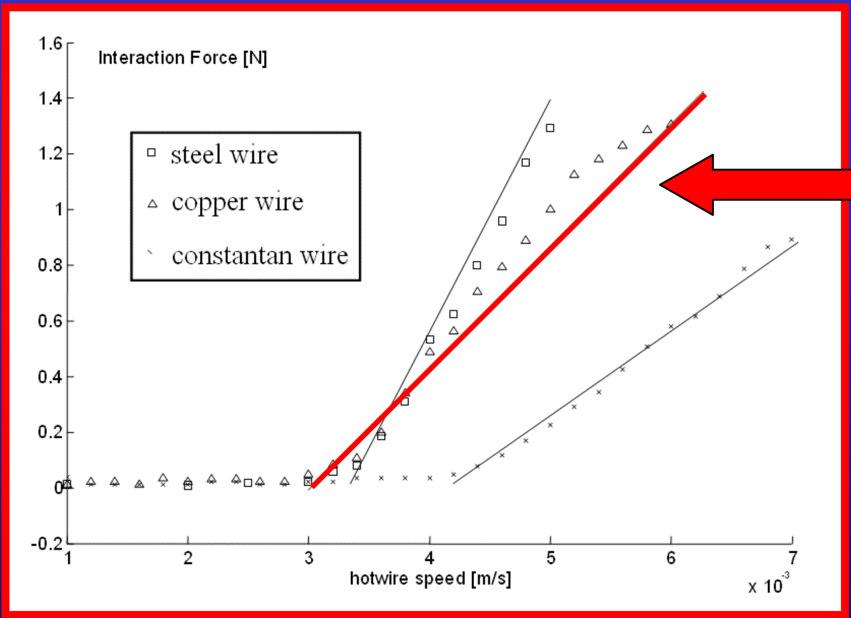
Risultati

interazione “elastica”

interazione “viscosa”

$$F_c = {}^{1}\!/_{\alpha}$$

$$F_{eq} = F_p\left(\dot{x}_{eq}\right) = \frac{1 + q_m/(c_m\beta)}{\alpha + 1/(c_m\beta)}$$



Dove:

- q_m, c_m dipendono dal materiale
- β dipende dalla pianificazione della traiettoria

Difetto :

nel 2005...

- La forza di quilibrio dipende da α e dai parametri che identificano la relazione F-v.

$$F_{eq} = \frac{1 + q_m / (c_m \, \beta)}{\alpha + 1 / (c_m \, \beta)}$$

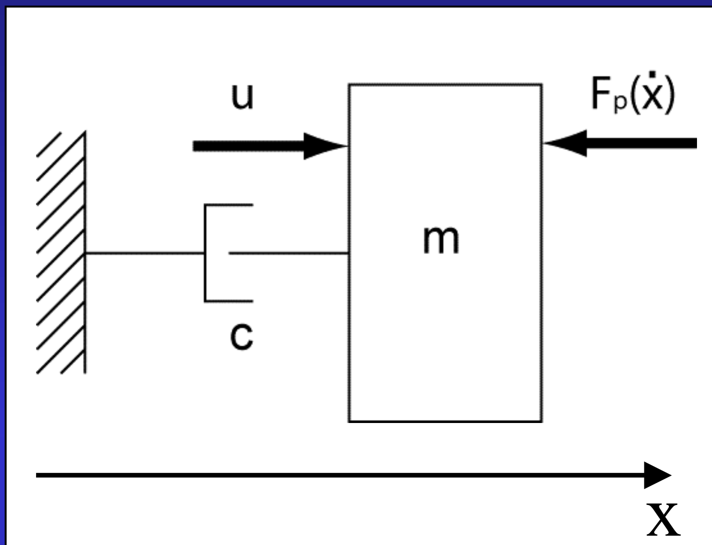
Sviluppi Futuri del DRC:

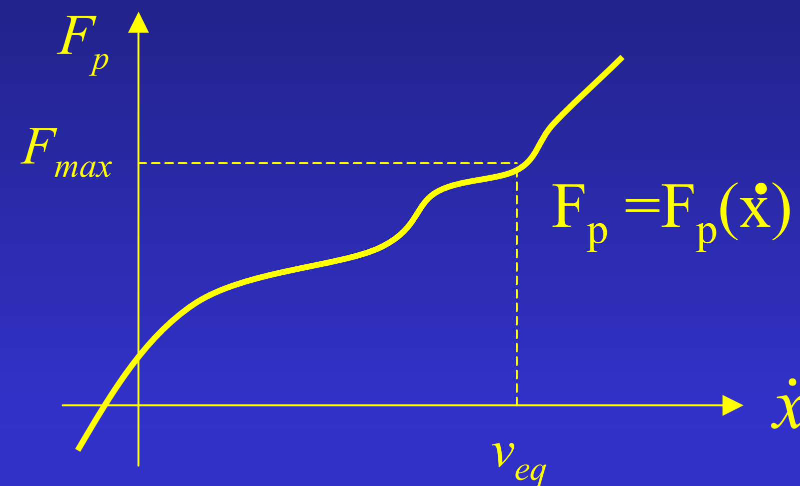
- Studio di un DRC che consenta di settare la forza di equilibrio con un solo parametro, indipendentemente dalla relazione F-v

(DVRC ?)

Teoria del DVRC – background -

(Delayed Velocity Reference Control)





Per mantenere $F_p = F_{max}$

$$\begin{cases} F_p < F_{max} \\ F_p = F_{max} \\ F_p > F_{max} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{incrementare } \dot{x} \\ \text{mantenere } \dot{x} \\ \text{ridurre } \dot{x} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \ddot{x}_d(F_{max}) = 0 \\ \ddot{x}_d > 0 \quad per \quad F_p < \bar{F}_p \\ \ddot{x}_d < 0 \quad per \quad F_p > \bar{F}_p \end{cases}$$

Teoria del DVRC – background -

(Delayed Velocity Reference Control)

$$\ddot{x}_d(F_p) = A_{\max}\left(1 - \frac{F_p}{F_{\max}}\right)$$

$$d\left(\frac{dx_d}{dt}\right) = A_{\max}\left(1 - \frac{1}{F_{\max}}F_p\right)dt$$

$$\frac{dx_d}{dt} = A_{\max}\left(t - \int_0^t \frac{1}{F_{\max}}F_p dt\right) = A_{\max}\left(t - \int_0^t \alpha F_p dt\right) = A_{\max}(t - T)$$

$$T = \int_0^t \frac{1}{F_{\max}}F_p dt = \int_0^t \alpha F_p dt$$

$$\begin{cases} F_p < F_{max} \\ F_p = F_{max} \\ F_p > F_{max} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{incrementare} \\ \text{mantenere} \\ \text{ridurre} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \ddot{x}_d(F_{\max}) = 0 \\ \ddot{x}_d > 0 \quad per \quad F_p < \overline{F}_p \\ \ddot{x}_d < 0 \quad per \quad F_p > \overline{F}_p \end{cases}$$

Teoria del DVRC – background -

(Delayed Velocity Reference Control)

$$\ddot{x}_d(F_p) = A_{\max}\left(1 - \frac{F_p}{F_{\max}}\right)$$

$$d\left(\frac{dx_d}{dt}\right) = A_{\max}\left(1 - \frac{1}{F_{\max}}F_p\right)dt$$

$$\underline{\frac{dx_d}{dt}} = A_{\max}\left(t - \int_0^t \frac{1}{F_{\max}}F_p dt\right) = A_{\max}\left(t - \int_0^t \alpha F_p dt\right) = \underline{A_{\max}\left(t - T\right)}$$

$$T = \int_0^t \frac{1}{F_{\max}}F_p dt = \int_0^t \alpha F_p dt$$

$$dx_d = A_{\max}\left(t - T\right)dt$$

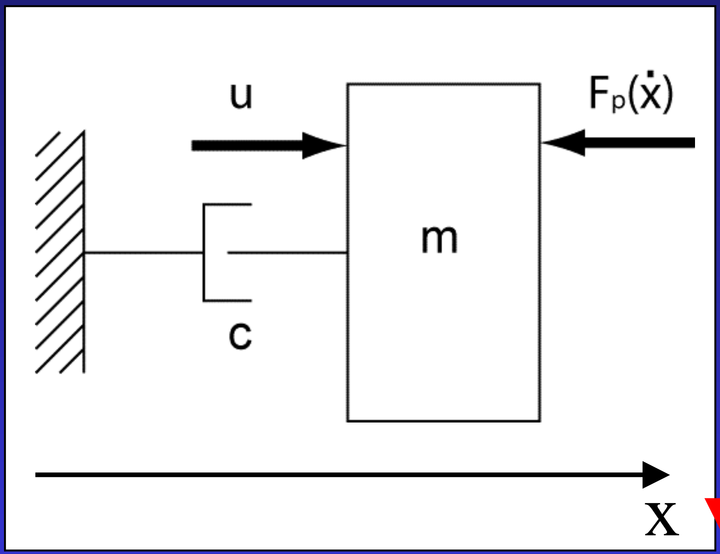
$$\underline{x_d} = A_{\max}\int_0^t (t-T)dt = A_{\max}\int_0^t\left(t - \int_0^t \frac{F_p}{F_{\max}}dt\right)dt = \underline{A_{\max}\eta}$$

$$\eta = \int_0^t (t-T)dt$$

$$\begin{cases} \ddot{x}_d(\overline{F}_p) = 0 & \\ \ddot{x}_d > 0 \quad per \quad F_p < \overline{F}_p \\ \ddot{x}_d < 0 \quad per \quad F_p > \overline{F}_p \end{cases}$$

Da qui ha origine il nome DVRC

Teoria del DVRC



$$m\ddot{x} + c\dot{x} = k_P\left(x_d - x\right) + k_D\left(\dot{x}_d - \dot{x}\right) - F_p\left(\dot{x}\right)$$

$$\Phi_F\left(\dot{x}\right) \overset{def}{=} \frac{1}{F_{\max}} F_p\left(\dot{x}\right) \Rightarrow T = \int_0^t \Phi_F \, dt \Rightarrow \eta = \int_0^t \left(t - T\right) dt$$

$$x_d = g(\eta) = g\left(\int_0^t \left(t - T\right) dt\right) = g\left(\int_0^t \left(t - \int_0^t \Phi_F \, dt\right) dt\right)$$

$$m\ddot{x} + \left(c + k_d\right)\dot{x} + k_P x = k_P g(\eta) + k_D\left(\frac{dg}{dt}\right) - F_p\left(\dot{x}\right)$$

$$m\ddot{x} + \left(c + k_d\right)\dot{x} + k_P x = k_P g(\eta) + k_D\left(\frac{dg}{dt}\right) - F_{\max}\Phi_F\left(\dot{x}\right)$$

- Condizione di equilibrio

- Stabilità

DVRC - equilibrio

$$m\ddot{x} + (c + k_d)\dot{x} + k_P x = k_P g(\eta) + k_D\left(\frac{dg}{dt}\right) - F_p(\dot{x})$$

$$m\ddot{x} + (c + k_d)\dot{x} + k_P x = k_P g(\eta) + k_D\left(\frac{dg}{dt}\right) - F_{\max}\Phi_F(\dot{x})$$

[…]

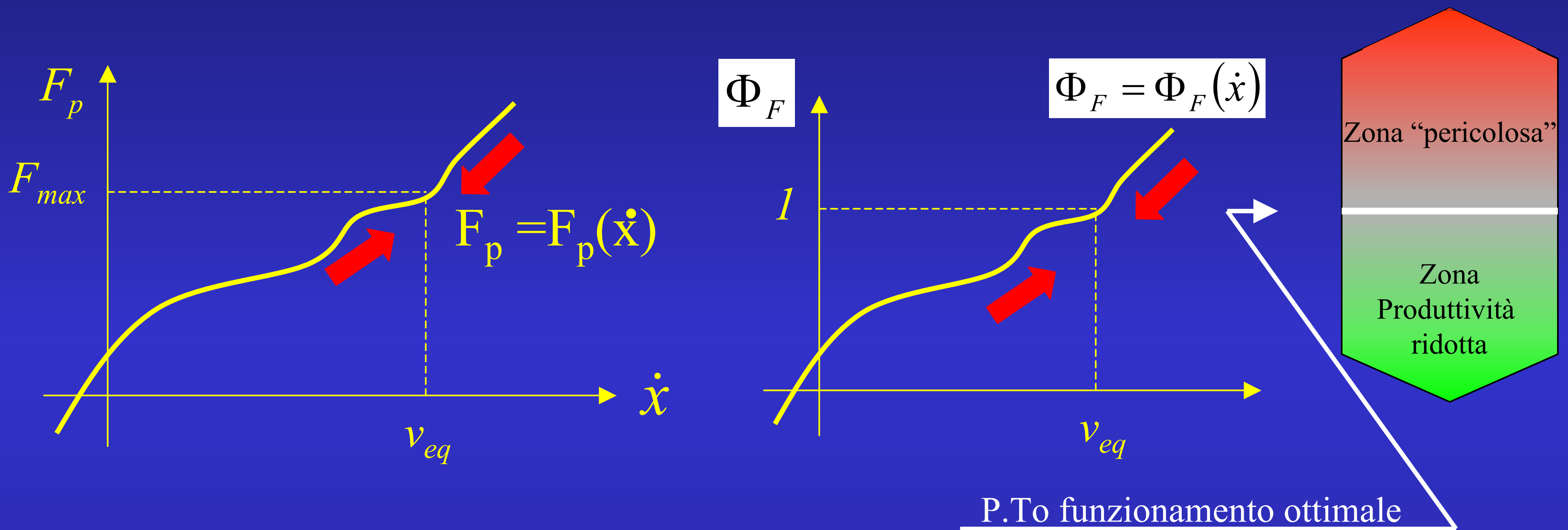
$$(1 - \Phi_F) = 0 \quad \Rightarrow \quad \Phi_F = 1 \quad \Rightarrow \quad \boxed{F_p = F_{\max} = 1/\alpha}$$

- Condizione di equilibrio indipendente da legame F-v

- Forza di equilibrio settata *con un solo parametro*

DVRC - equilibrio

$$(1-\Phi_F)=0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Phi_F=1} \quad \Rightarrow \quad F_p=F_{\max}=1/\alpha$$



DVRC tende a mantenere invariato il punto di funzionamento

Significato Φ_F: collegato a grado di pericolosità

DVRC – Osservazione

$$\ddot{x}_d = \frac{dg}{d\eta}\left(1 - \Phi_F\right)$$

$$\Phi_F = \frac{F_p}{F_{\max}} = 1$$

- Work –
Optimum Condition

$$\Phi_F = \frac{F_p}{F_{\max}} = 0$$

- NOT Working –
Null force

$$\ddot{x}_d = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{x}_d = \text{cost}$$

Risultato cercato

$$\ddot{x}_d = \text{cost} \quad \Rightarrow \quad x_d \propto t^2$$

Problema

Si accoppia un controllo di velocità al controllo di forza

DVRC – Controllo di Velocità

$$\Phi_F(\dot{x}) \overset{def}{=} \frac{1}{F_{\max}} F_p(\dot{x})$$

funzione Φ

$$\Phi_V \overset{def}{=} \frac{\dot{x}}{V_{\max}}$$

$$T = \int_0^t \Phi_F \, dt$$

Velocity delay

$$T = \int_0^t \Phi_V \, dt$$

$$\eta = \int_0^t (t - T)\, dt = \eta(t)$$

$$\eta = \int_0^t (t - T)\, dt = \eta(t)$$

$$x_d = g(\eta) = g\left(\int_0^t (t - T) dt\right)$$

$$x_d = g(\eta) = g\left(\int_0^t (t - T) dt\right)$$

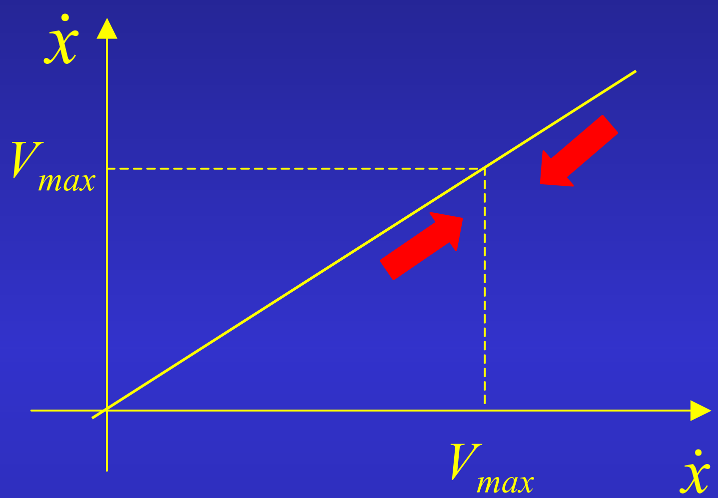
$$F_p = F_{\max}$$

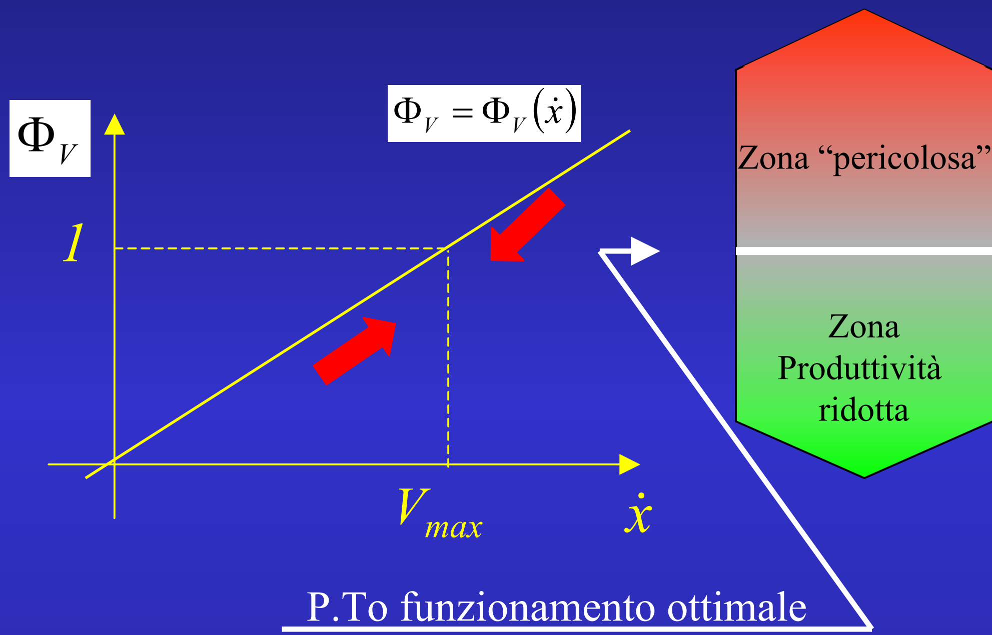
Risultato DVRC

$$\dot{x} = V_{\max}$$

DVRC - equilibrio

$$\left(1-\Phi_V\right)=0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\Phi_V = 1} \quad \Rightarrow \quad \dot{x} = V_{\max}$$





DVRC tende a mantenere invariato il punto di funzionamento

Significato Φ_V: collegato a grado di pericolosità

DVRC – Unione Controlli F-V

$$\Phi_F(\dot{x}) \stackrel{def}{=} \frac{1}{F_{\max}} F_p(\dot{x})$$

$$\Phi_V \stackrel{def}{=} \frac{\dot{x}}{V_{\max}}$$

$$\Phi = \max\left(\Phi_F, \Phi_V\right)$$

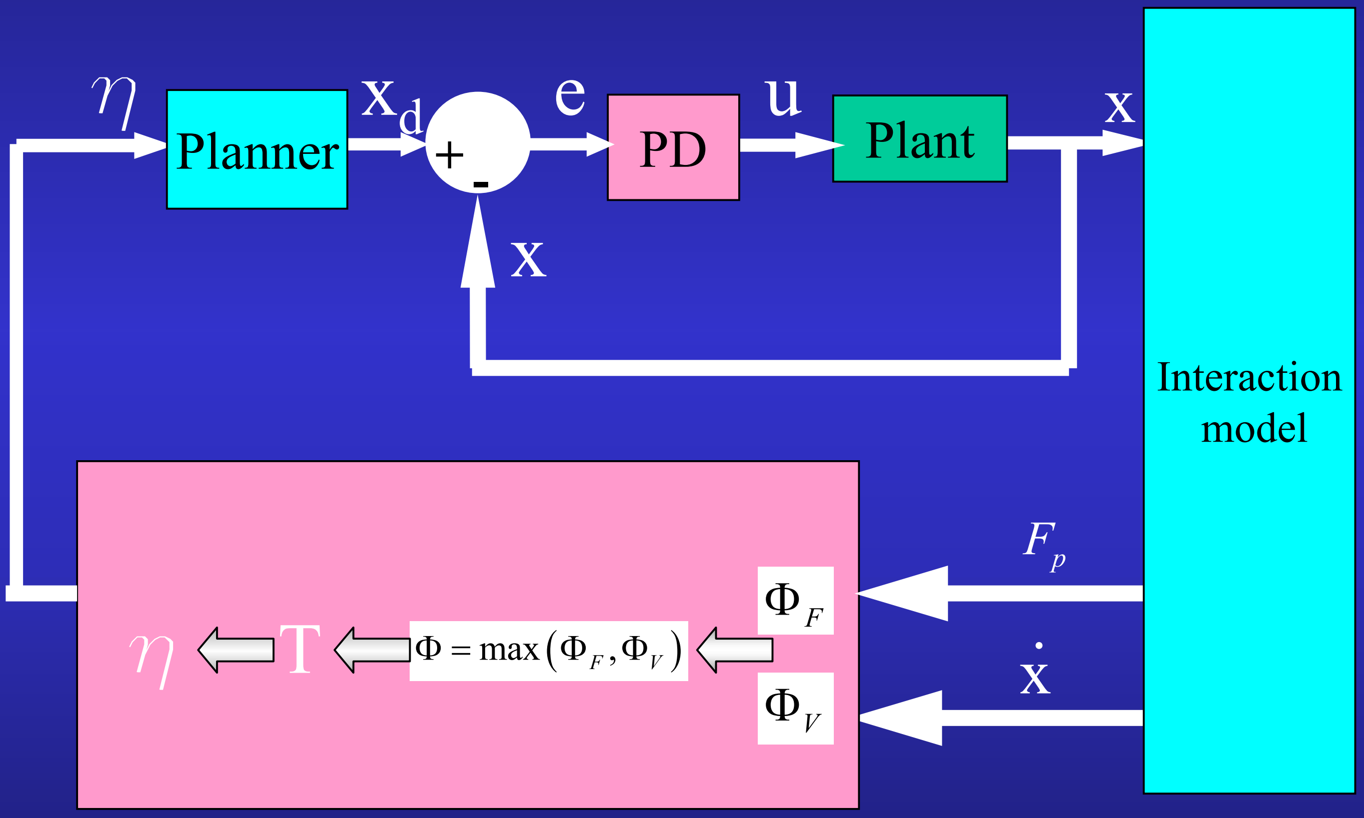
E' scelta a favore della sicurezza

$$T = \int_0^t \Phi \, dt$$

$$\eta = \int_0^t (t - T)\, dt = \eta(t)$$

$$x_d = g(\eta) = g\left(\int_0^t (t - T)\, dt\right)$$

DVRC – Unione Controlli F-V



DVRC Block

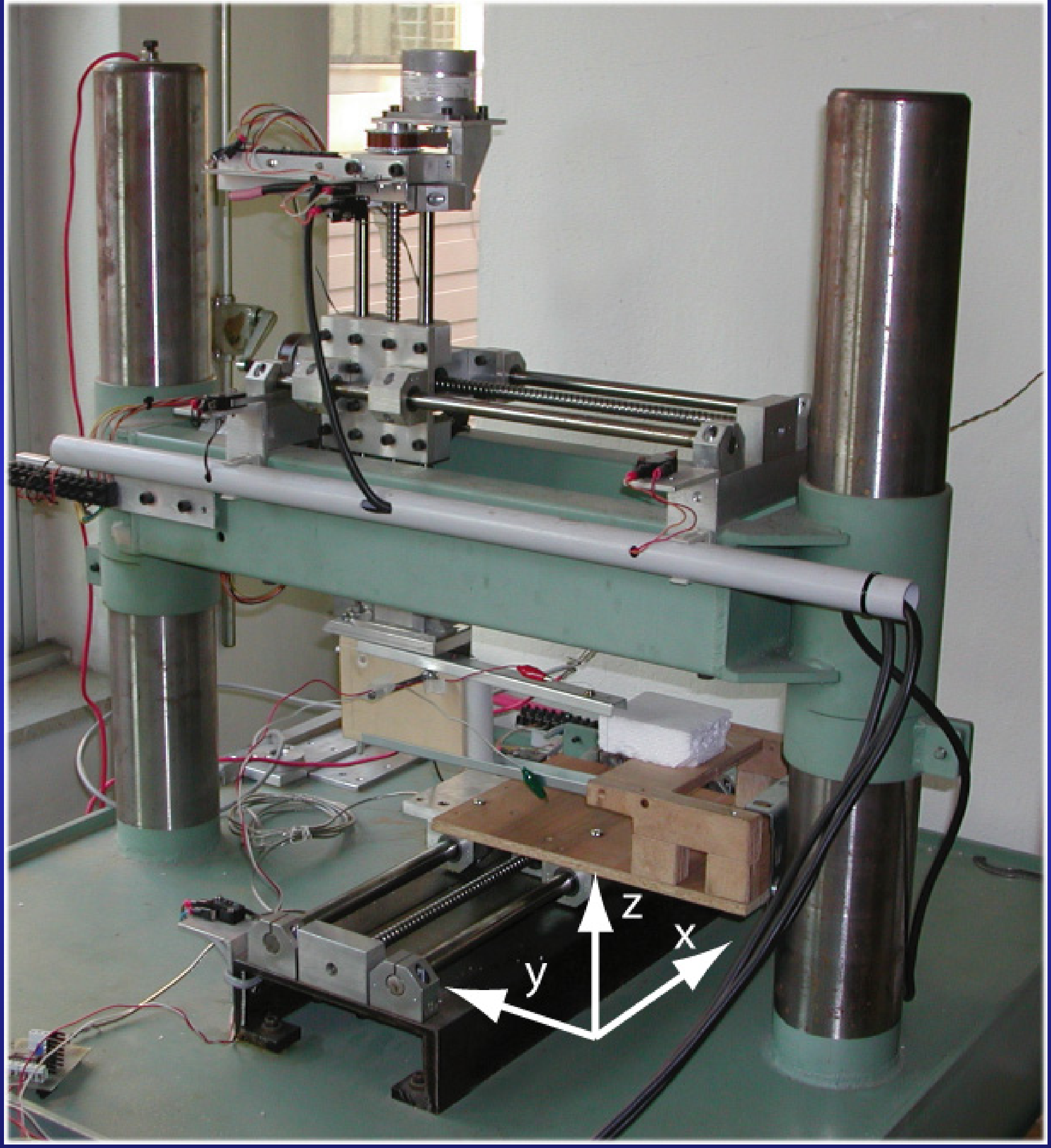
DVRC - stabilità

- Trattazione unica per controllo di forza/velocità

$$\ddot{x}_d = \frac{dg}{d\eta}(1-\Phi \quad) = \beta(1-\Phi \quad)$$

Accelerazione massima consentita:
Ha un massimo!
NB. $\beta = A_{max}$

DVRC – Test Setup



-NI 6024E

-NI CVI compiler

-1kHz

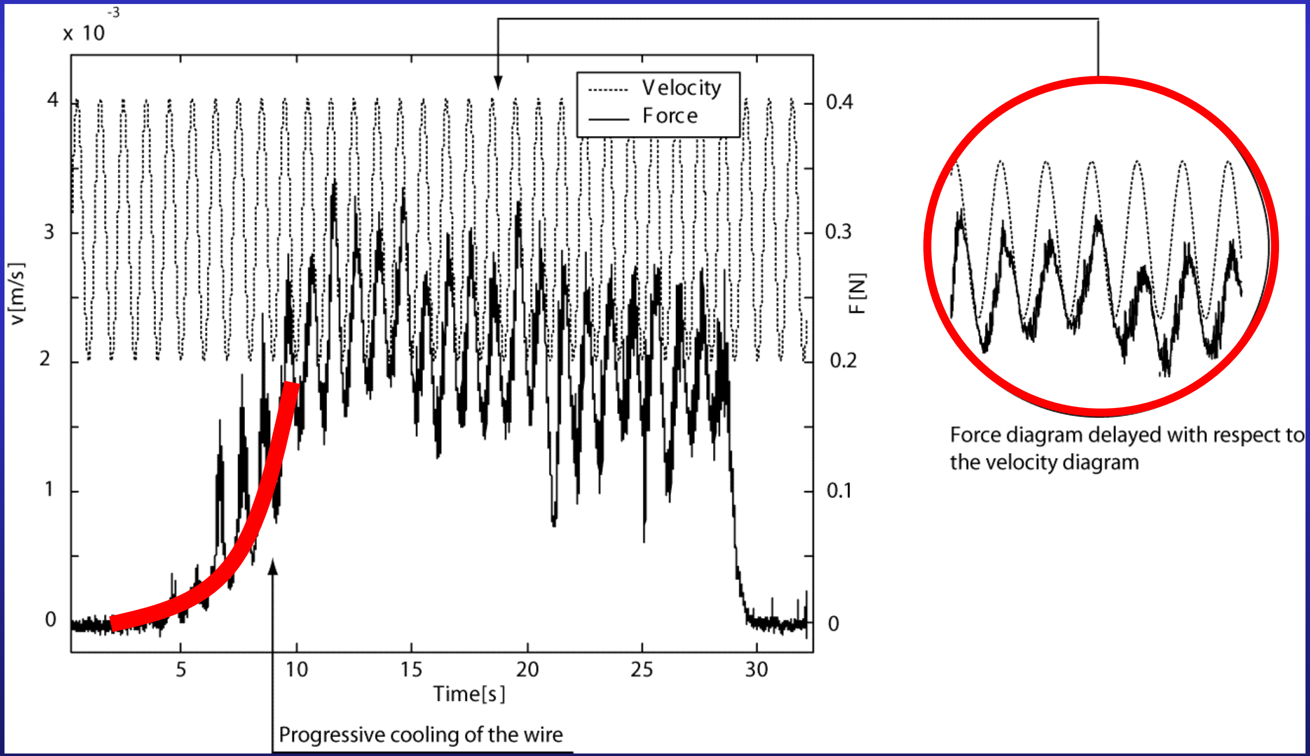
- load cell FUTEK LRF300

DVRC – Hotwire

$$\dot{x}(t) = \bar{v} + \Delta v \sin(\omega t)$$
$$\Delta v = 1 mm/s$$
$$\bar{v} = 3 mm/s$$
$$\omega = 6.28 \ rad/s$$

$$\cancel{F(t) = \bar{F} + \Delta F \sin(\omega t)}$$

$$F(t) = \bar{F} + \Delta F \sin(\omega t + \rho)$$

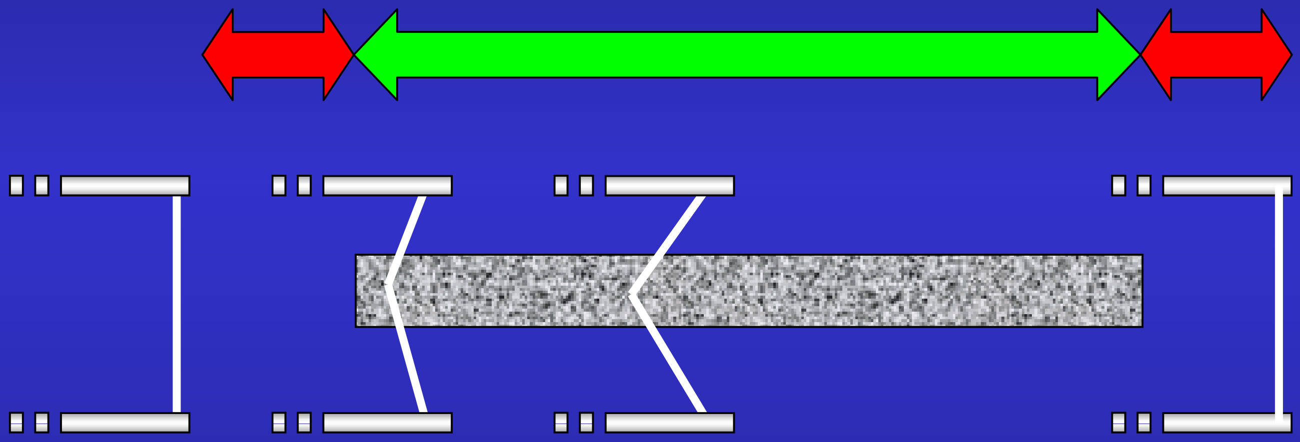


DVRC – Risultati Test

$$V_{\max} = 0.005\, m/s$$

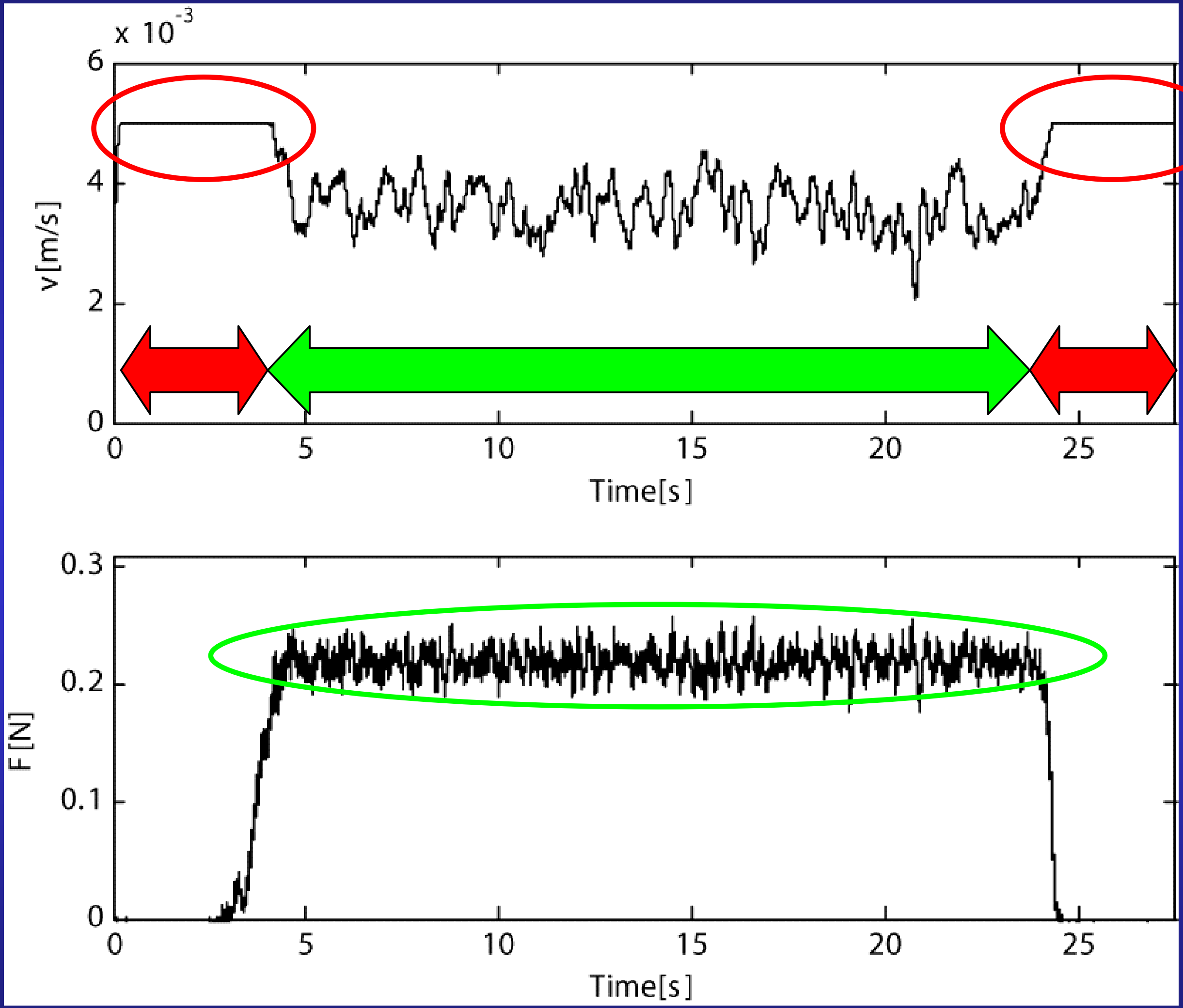
$$F_{\max} = 0.22\, N$$

$$A_{\max} = 0.1\, m/s^2$$



DVRC – Risultati Test

$$V_{max} = 0.005\, m/s$$
$$F_{max} = 0.22\, N$$
$$A_{max} = 0.1\, m/s^2$$

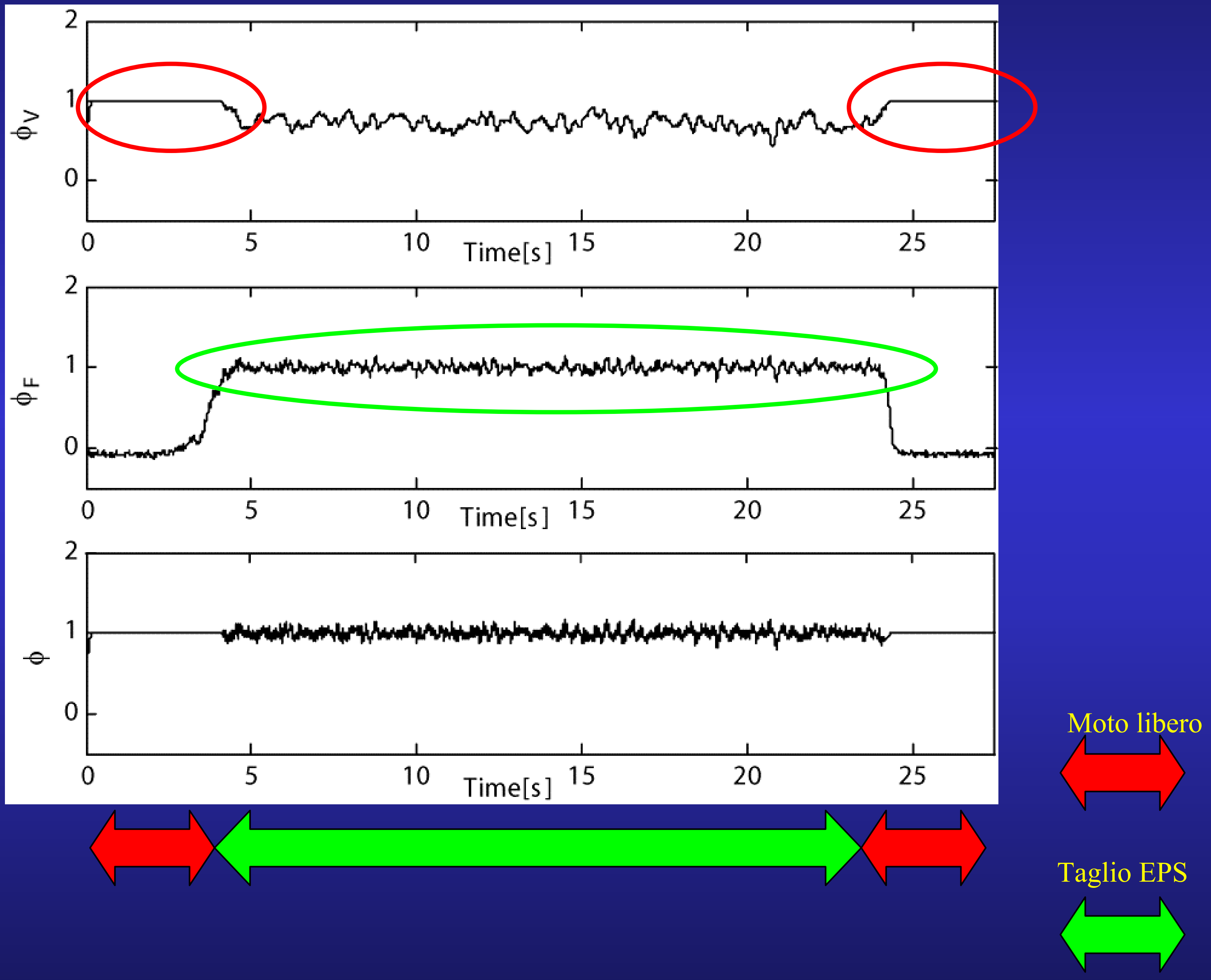


Moto libero

Taglio EPS

DVRC – Risultati Test

$$V_{\max} = 0.005\ m/s$$
$$F_{\max} = 0.22\ N$$
$$A_{\max} = 0.1\ m/s^2$$



DVRC – Conclusioni

- Il DRC aveva mostrato dei difetti nei casi in cui l'inerazione è *velocity dependant*
- Questa è stata la motivazione che ha richiesto lo sviluppo di un nuovo controllo NTB
- Il DVRC sviluppato consente di settare, per un task, la forza ottimale, la velocità ottimale di moto libero e l'accelerazione massima del corpo.
- Simulazioni e test sperimentali hanno confermato i risultati teorici
- Il lavoro è stato pubblicato sull'International Journal of Machine Tools and Manifacture

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DOTTORATO DI RICERCA IN MECCANICA APPLICATA, XIX CICLO.
ANNO ACCADEMICO 2004/2005

Tecniche di controllo di forza di tipo "Non Time Based"

Dottorando: Paolo Pascutto[1]

Tutore: prof. Aldo Rossi[2]
Co-turore: prof. Paolo Gallina[1]

[1] Dip. di Ingegneria Meccanica, Università di Trieste, Via A. Valerio 10 - 34127, TS;
pgallina@units.it Tel: +39 (040) 558 2540.
pascutto@libero.it

[2] Dip. di Innovazione Meccanica e Gestionale, Università di Padova