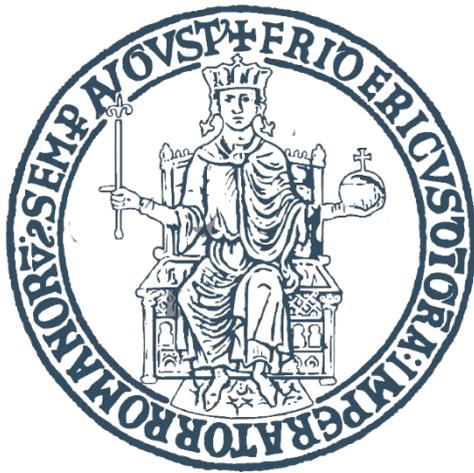


Incontro GMA

Napoli 21-22 luglio 2016

Presso l'Università degli Studi di Napoli "Federico II"



RACCOLTA DELLE PRESENTAZIONI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA

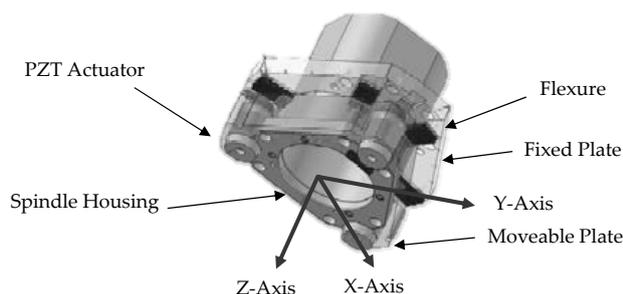
*A cura della Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II"*

Francesco Aggogeri

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale – Università di Brescia

Studio e sviluppo di sistemi mecatronici per il contenimento attivo delle vibrazioni

L'obiettivo della ricerca è la progettazione funzionale e lo sviluppo di sistemi mecatronici, integrabili in macchine operatrici con lo scopo di incrementarne le prestazioni e la modularità. La ricerca vuole affrontare differenti problematiche relative alla precisione delle lavorazioni e delle movimentazioni della macchina, quali la presenza di vibrazioni (libere smorzate, forzate, autoeccitate) o la mancanza di precisione nel posizionamento (ad esempio del pezzo in lavorazione). Il presente documento illustra uno dei dispositivi mecatronici in fase di studio, capace di controllare attivamente e smorzare le vibrazioni indotte dal processo (ad esempio originate da motori elettrici, eccentricità, squilibrio di organi rotanti, errori di forma e usura degli ingranaggi). Il dispositivo - Smart Platform (SP) - si basa su di una piattaforma flessibile interposta tra il ram ed il mandrino della macchina, costituita da tre attuatori piezoelettrici con controllo attivo delle vibrazioni (AVC – Active Vibration Control), fig.1. Gli attuatori sono precaricati, ad elevata dinamica e forza ed includono elementi innovativi capaci di ottimizzare la rigidità e disaccoppiare forze trasversali, al fine di utilizzarli efficacemente nei processi di taglio. I tre attuatori piezoelettrici permettono il movimento relativo delle due piattaforme. In prossimità della punta dell'utensile è posizionato un accelerometro triassiale; nel momento in cui è rilevato uno spostamento i tre attuatori sono attivati dinamicamente al fine di compensare le vibrazioni e ridurre il loro effetto sulla superficie lavorata. E' stata svolta una analisi funzionale del dispositivo a partire dal concept (fig.1), per poi sviluppare il modello cinematico e dinamico con il supporto di analisi agli elementi finiti per simulare e valutare sperimentalmente le vibrazioni delle macchina operatrice e del dispositivo. Il modello è stato completato dal controllo, adottando la tecnica H2-LQG (Linear Quadratic Gaussian). La simulazione (Matlab-Simulink) dell'anello chiuso in feedback dell'accelerazione ha confermato la funzionalità del sistema mecatronico. E' stato quindi realizzato il prototipo e svolta una campagna di validazione sperimentale, integrando la piattaforma in macchina (fig.2). Nelle prove è stato ricreato il fenomeno di disturbo del mancato bilanciamento dell'utensile, a diversi giri del mandrino, al fine di verificare come il dispositivo controllasse e smorzasse le vibrazioni indotte (fig.3).



$$\{M\} \cdot \ddot{\xi} + \{V\} \cdot \dot{\xi} + \{K\} \cdot \xi = F \quad (1)$$

$$\chi = \begin{Bmatrix} \dot{\xi} \\ \xi \end{Bmatrix} \rightarrow \dot{\chi} = \{A\} \cdot \chi + \{B\} \cdot \varepsilon \quad (2)$$

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \rightarrow \psi = \{C\} \cdot \chi + \{D\} \cdot \varepsilon$$

$\chi(t)$: vettore di stato; $\varepsilon(t)$: vettore dei disturbi

Fig. 1 - Il dispositivo mecatronico (concept) ed esempio di modello matematico

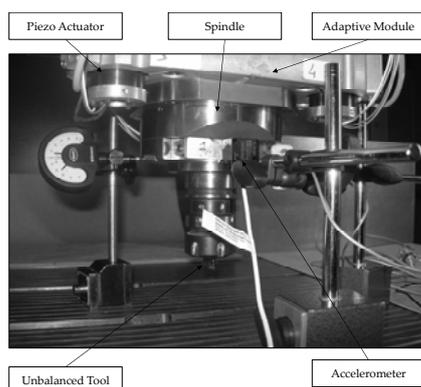


Fig. 2 - Il prototipo integrato nella macchina

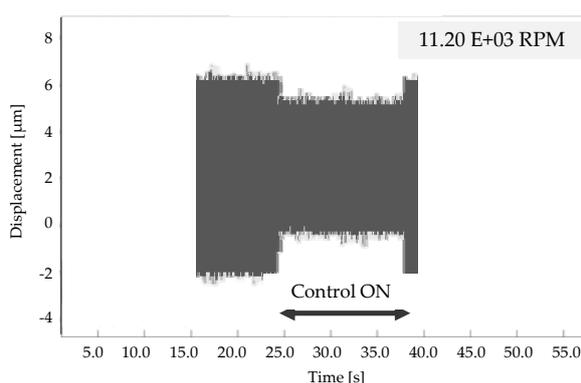


Fig. 3 - I risultati sperimentali

I risultati mostrano la capacità del dispositivo mecatronico di controllare e smorzare le vibrazioni presenti durante il processo (fig.3), in particolare le prove sperimentali hanno evidenziato uno smorzamento del 30% delle ampiezze nel range di frequenza 200-400 Hz.

1. F. Aggogeri, F. Al-Bender, B. Brunner, M. Elsaid, M. Mazzola, A. Merlo, D. Ricciardi, M. de la O Rodriguez, E. Salvi (2013), E. Design of piezo-based AVC system for machine tool applications. Mechanical Systems and Signal Processing, 36 (1), 53-65
2. A. Borboni, R. Faglia, F. Aggogeri (2013) Design and analysis of a fiber shaped micro-actuator for robotic gripping, International Journal of Advanced Robotic Systems, 10:149

Michele Gabrio Antonelli
Università degli Studi dell'Aquila

Attuatori pneumatici flessibili: soft actuators

Il filone di ricerca è focalizzato sulla modellazione, la prototipazione di attuatori pneumatici flessibili e la loro integrazione in sistemi complessi. Tali attuatori basano il loro funzionamento su membrane realizzate in materiale elastico deformabile utilizzato come unico componente o combinato ad una struttura di rinforzo.

Sviluppo e caratterizzazione di una pinza per NOTES azionata da attuatori a rigidezza variabile

La pinza è costituita da un sistema di presa, una trasmissione ed un sistema di attuazione: quest'ultimo è realizzato mediante due attuatori pneumatici a membrana circolare (diametro deformabile 10 mm; spessore 0.3 mm) montati in configurazione agonista-antagonista. Un modello cineto-dinamico delle dita ed un modello non lineare agli elementi finiti sono alla base della progettazione degli attuatori. Il prototipo della pinza (dimensioni di massima: lunghezza 61.17 mm; diametro corpo pinza 14.62 mm; angolo massimo di apertura 68°; massa 110 g) è stato sottoposto a prove sperimentali di caratterizzazione e validazione (forza massima per dito 2.5 N a 3 bar; rilievo della rigidezza variabile).

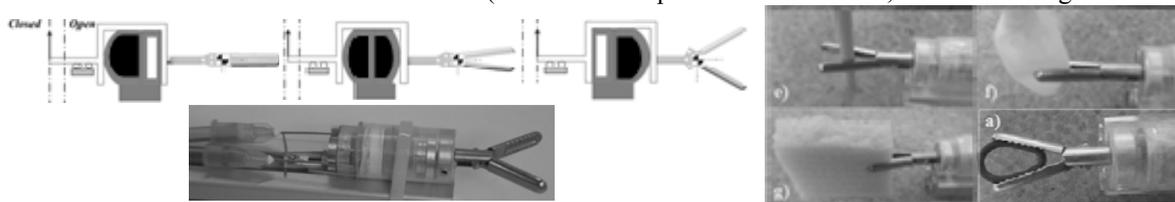


Fig. 1 – Pinza per NOTES: principio di funzionamento, prototipo e test di afferraggio

Modellazione numerica e validazione sperimentale di un attuttore a muscolo pneumatico

E' stato sviluppato un modello parametrico non lineare agli elementi finiti di un McKibben, basato su grandezze geometriche reali e sulle caratteristiche del materiale del corpo cilindrico (iperelastico con formulazione di Mooney-Rivlin del primo ordine) e della guaina. Per la validazione, una campagna di prove isometriche ed isotoniche è stata condotta su un prototipo progettato e realizzato ad hoc; le stesse sono state simulate con un modello avente caratteristiche analoghe al prototipo. I risultati numerici hanno mostrato andamenti congruenti con quelli sperimentali.

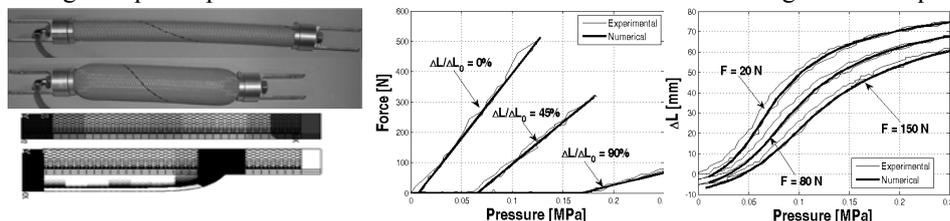


Fig. 2 – Muscolo McKibben: prototipo sperimentale e modello numerico a confronto

Sviluppo di un dito per una mano di un robot collaborativo (attività in corso)

Il dito è un attuttore flessibile da realizzare con un corpo cilindrico in silicone (diametro interno 15 mm; spessore parete 1.5 mm) rinforzato internamente da una maglia cilindrica a trama quadrata con discontinuità in direzione assiale. Un modello agli elementi finiti parametrico è stato sviluppato per la progettazione e l'ottimizzazione delle dita della mano.

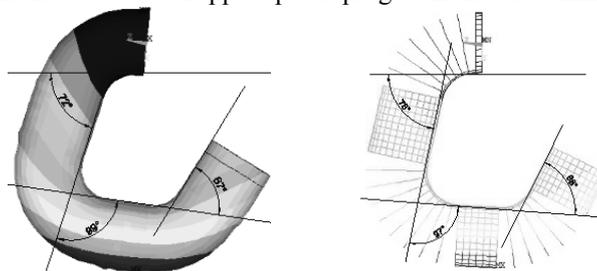


Fig. 3 – Modello numerico del dito: il corpo cilindrico in silicone e la struttura interna di rinforzo

Lavori più rappresentativi:

1. M.G. Antonelli, P. Beomonte Zobel, P. Raimondi, T. Raparelli, G. Costanzo "An innovative brace with pneumatic thrusts for scoliosis treatment", Int. J. of Design & Nature and Ecodynamics, 2010, 5(4), pp. 1-14
2. M.G. Antonelli, P. Beomonte Zobel, F. Durante, F. Gaj "Development and testing of a grasper for NOTES powered by variable stiffness pneumatic actuation", Int. J. of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, *under review*
3. M.G. Antonelli, P. Beomonte Zobel, F. Durante, T. Raparelli "Numerical modelling and experimental validation of a McKibben pneumatic muscle actuator", The International Journal of Robotic Research, *under review*

Tommaso Argentini
Politecnico di Milano

Aerodinamica e aeroelasticità delle strutture

L'attività di ricerca riguarda principalmente l'interazione vento-struttura ed in particolare lo studio degli effetti dell'azione del vento sulla dinamica dei sistemi. L'attività viene affrontata da un punto di vista analitico, numerico e sperimentale, affrontando principalmente le seguenti tematiche: risposta dinamica delle strutture snelle soggette al forzamento indotto dal vento turbolento; fenomeni di instabilità dinamica dovuti ai campi di forze aeroelastiche non conservativi (ad es. instabilità da flutter a più gradi di libertà, vedi Fig. 1); risposta delle strutture soggette a forzamento indotto da distacco di vortici. Le strutture analizzate sono principalmente strutture snelle, quali ponti a grande luce, coperture di stadi, torri ed edifici a grande sviluppo verticale, per le quali la risposta dinamica derivante dall'interazione vento ricopre un aspetto molto rilevante, poiché può condurre all'affaticamento, all'inservibilità od al collasso strutturale.

Da un punto di vista sperimentale, l'attività viene svolta principalmente in galleria del vento su modelli in scala, dove vengono implementate delle tecniche sperimentali che consentono: di simulare la risposta della struttura soggetta alle azioni del vento [1,2,3]; di implementare tecniche di identificazione modale e di controllo delle vibrazioni attive e passive [2]; di misurare le forze aerodinamiche ed aeroelastiche per poter sviluppare modelli analitici di interazione-fluido struttura [5,6,7].

Da un punto di vista analitico e numerico, gli aspetti più critici riguardano la modellazione delle forze aerodinamiche e la loro interazione con le strutture, considerando la dipendenza non lineare del fenomeno rispetto a diversi parametri quali l'ampiezza e la frequenza di vibrazione della struttura, le forme modali coinvolte, le caratteristiche spaziotemporali e ed il contenuto armonico del vento turbolento incidente [1,4-7].



Fig. 1 – Fotogrammi video della verifica sperimentale in galleria del vento dell'instabilità dinamica da flutter sul modello in scala 1:220 dell'Izmit Bay Bridge. [1]

Lavori più rappresentativi:

1. Argentini, T.; Diana, G.; Rocchi, D. & Somaschini, C. "A case-study of double multi-modal bridge flutter: Experimental result and numerical analysis", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 151, 25-36.
2. Argentini, T.; Rosa, L. & Zasso, A., "Wind-induced vibrations of the stay-cables of a roundabout flyover: assessment, repair, and countermeasures", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016.
3. Argentini, T.; Rocchi, D. & Zasso, A., "Aerodynamic interference and vortex-induced vibrations on parallel bridges: The Ewijk bridge during different stages of refurbishment", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 147, 276 – 282.
4. Argentini, T.; Pagani, A.; Rocchi, D. & Zasso, A., "Monte Carlo analysis of total damping and flutter speed of a long span bridge: Effects of structural and aerodynamic uncertainties", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 128, 90-104.
5. Diana, G.; Rocchi, D. & Argentini, T., "An experimental validation of a band superposition model of the aerodynamic forces acting on multi-box deck sections" *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2013, 113, 40-58.
6. Argentini, T.; Rocchi, D.; Muggiasca, S. & Zasso, A., "Cross-sectional distributions versus integrated coefficients of flutter derivatives and aerodynamic admittances identified with surface pressure measurement", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 104--105, 152-158.
7. Diana, G.; Rocchi, D.; Argentini, T. & Muggiasca, S., "Aerodynamic instability of a bridge deck section model: Linear and nonlinear approach to force modeling", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98, 363-374.

Alessio Artoni

Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale, Università di Pisa

Ottimizzazione geometrica di ruote dentate e pianificazione di traiettorie per sistemi robotici

Ottimizzazione geometrica di ruote dentate. La progettazione moderna di ruote dentate mira a ottenere prodotti meccanicamente efficienti, affidabili, e con elevata densità di potenza. Ciò richiede una fase di design optimization, finora demandata alle abilità di pochi operatori esperti, e tipicamente consistente in approcci trial-and-error con tempi di sviluppo consistenti e risultati subottimali. Questa attività di ricerca ha riguardato l’ottimizzazione della micro-geometria di ingranaggi ipoidi, ma le metodologie sviluppate sono del tutto generali. È stato conveniente formulare l’intero problema come due sottoproblemi distinti: determinazione della micro-geometria ottimale e identificazione dei parametri macchina-utensile necessari per realizzare la micro-geometria ottimale mediante rettifica. Sono state sviluppate tecniche di ottimizzazione simulation-based in grado di gestire funzioni di costo conflittuali e di incorporare robustezza a variazioni di parametri progettuali e operativi. Il problema inverso di identificazione dei parametri macchina è stato ricondotto ad un problema ai minimi quadrati non lineari. Buona parte dei risultati di questa attività è stata implementata in un software per GE Avio Aero (per ottimizzazione di coppie spiroconiche aerospace) e in un modulo del programma WindowsLDP del GearLab, Ohio State University.

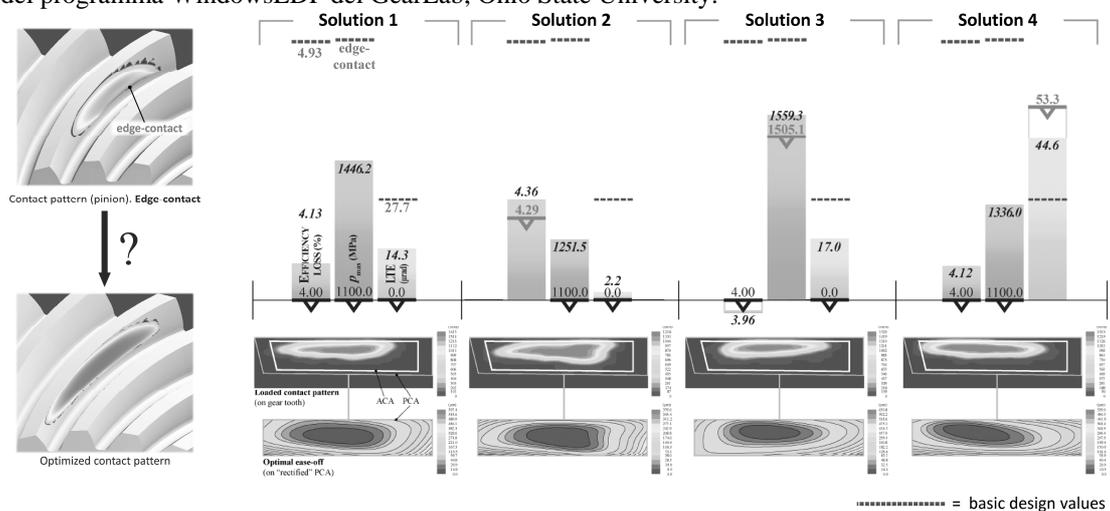


Fig. 1 – Soluzioni Pareto-ottime per micro-geometria di ingranaggi ipoidi

Pianificazione di traiettorie per sistemi robotici. Una sfida aperta nella pianificazione di traiettorie e controllo ottimo di sistemi robotici è la gestione dei contatti. In tali task, l’approccio più adottato finora consiste nello specificare *a priori* una sequenza di contatti (spesso limitante). Solo recentemente sono apparsi metodi basati su direct transcription e ottimizzazione che non specificano tale sequenza a priori, lasciando all’ottimizzatore il compito di determinare gli eventi di contatto. L’attività di ricerca condotta in questo campo ha riguardato lo sviluppo di strategie efficienti per sistemi robotici finalizzate al raggiungimento di un certo task attraverso l’identificazione di traiettorie ottime in grado di gestire autonomamente la sequenza dei contatti con l’ambiente. Sono stati ottenuti risultati sia per whole-body motion planning di umanoidi che per lo sfruttamento dell’ambiente nella manipolazione robotica.

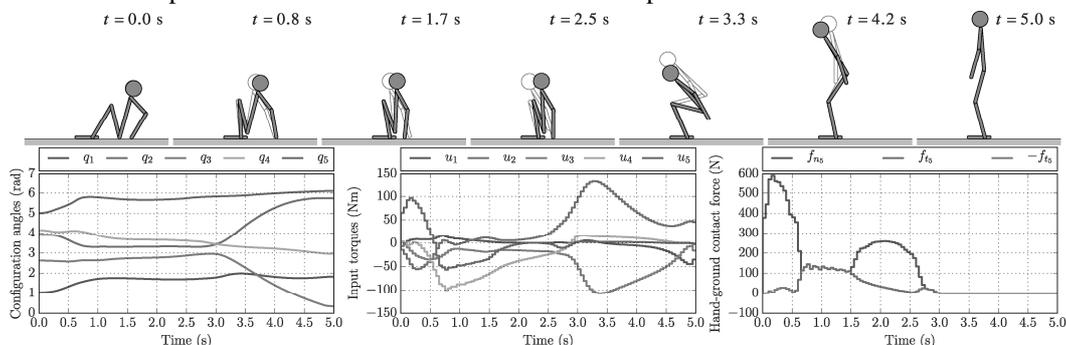


Fig. 2 – Traiettorie ottime ottenute per un umanoide nel task di alzarsi in piedi da seduto

Lavori più rappresentativi:

1. A. Artoni, M. Gabiccini, M. Guiggiani, and A. Kahraman, 2011 "Multi-objective ease-off optimization of hypoid gears for their efficiency, noise and durability performances, Journal of Mechanical Design, 133, 121007
2. T. Marcucci, M. Gabiccini, and A. Artoni, 2016 "A two-stage trajectory optimization strategy for articulated bodies with unscheduled contact sequences," IEEE Robotics and Automation Letters, 2(1), 104–111

Marco Barbieri, Antonio Zippo, Matteo Strozzi, Francesco Pellicano
Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari” - Università di Modena e Reggio Emilia
Tecniche di modellazione e testing di trasmissioni ad ingranaggi

L'attività di ricerca sulle trasmissioni a ingranaggi è iniziata presso il Laboratorio di Vibrazioni e Powertrain dell'Università di Modena e Reggio Emilia nel 2005, con il progetto SIMECH, poi confluito in Intermech. In un primo momento, il gruppo di ricerca ha sviluppato modelli predittivi del comportamento statico delle trasmissioni meccaniche, basati su un approccio integrato che combina la modellazione geometrica dei profili delle ruote dentate e la soluzione agli elementi finiti del problema di contatto. In una seconda fase, sono stati sviluppati modelli del comportamento dinamico delle coppie di ruote dentate. Queste attività hanno visto la partecipazione attiva di imprese del territorio regionale, attive nel campo degli ingranaggi, quali Case New Holland, Rossi Motoriduttori, Bonfiglioli. Grazie a queste collaborazioni è stato possibile sviluppare banchi per prove di vibrazione e estensimetriche su coppie di ruote e su riduttori completi. Tali banchi hanno svolto un ruolo fondamentale, permettendo di validare sperimentalmente i modelli sviluppati.

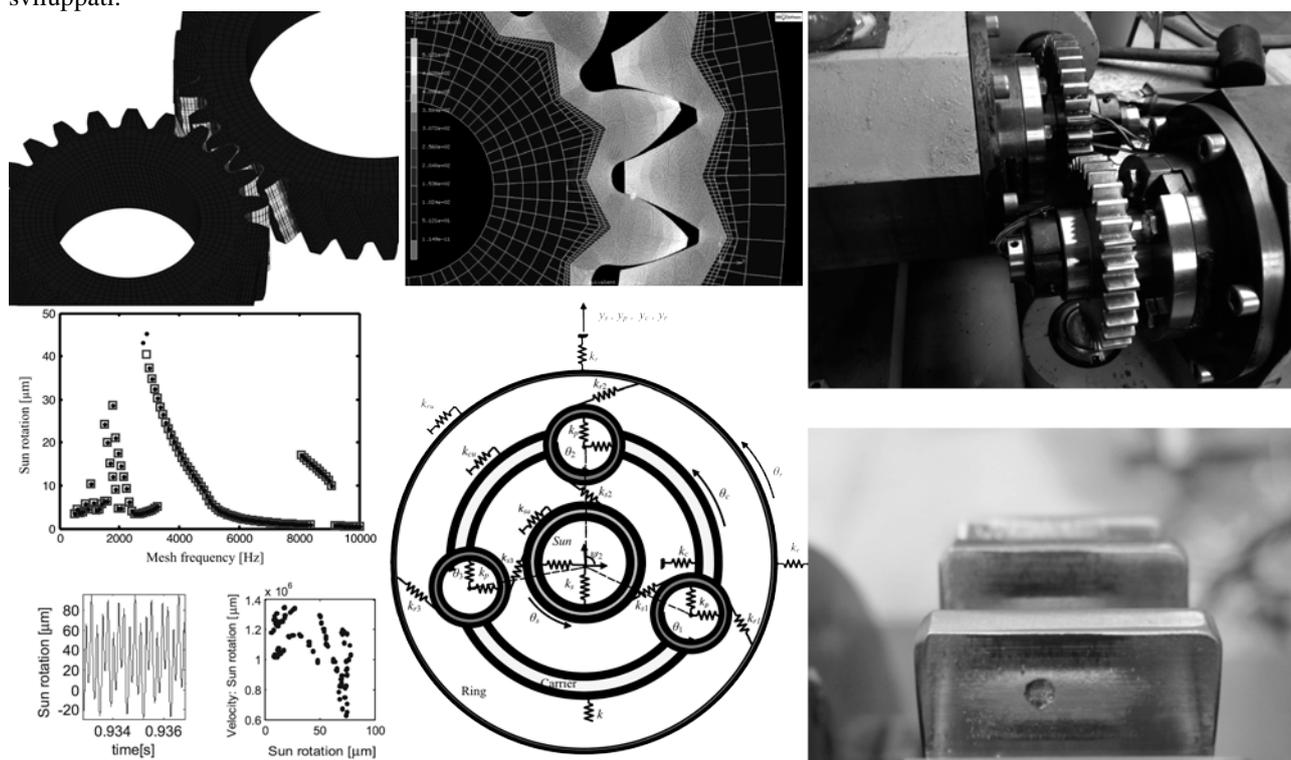


Fig. 1 – Modellazione statica/dinamica di trasmissioni a ingranaggi; sperimentazione

Recentemente, l'attività del laboratorio sul tema degli ingranaggi ha portato al finanziamento di diversi progetti di ricerca. Tra questi, IndGEAR è un progetto FP7 che ha come obiettivo lo sviluppo di metodologie per il condition monitoring nei riduttori a ingranaggi, con particolare riferimento all'identificazione precoce del pitting. Fortissimo High Performance Gear Analyzer - HPGA è un progetto FP7 per l'implementazione su piattaforma di calcolo ad alte prestazioni e in modalità cloud del software sviluppato dal Laboratorio per il calcolo statico/dinamico di trasmissioni ad ingranaggi. MetAGEAR, infine, è un progetto regionale avviato nel 2016. All'interno di MetAGEAR, il Laboratorio ha il coordinamento di un vasto gruppo di ricerca, avente competenze trasversali, con l'obiettivo di sviluppare tecniche di progettazione di trasmissioni ad ingranaggi, materiali, trattamenti e ricoprimenti innovativi per ingranaggi, metodologie ottimali per la produzione robotizzata di riduttori.

Lavori più rappresentativi:

1. G. Bonori, M. Barbieri, F. Pellicano, "Optimum profile modification for a spur gear pair by means of genetic algorithm", *Journal of Sound and Vibration*, 313(3-5), pp. 603-616, 2008.
2. M. Barbieri, G. Bonori, F. Pellicano, "Corrigendum to: Optimum profile modifications of spur gears by means of genetic algorithms", *Journal of Sound and Vibration*, 331(21), pp. 4825-4829, 2012.
3. M. Barbieri, A. Zippo, F. Pellicano, "Adaptive grid-size finite element modeling of helical gear pairs", *Mechanism and Machine Theory*, 82, pp. 17-32, 2014.
4. A. Masoumi, F. Pellicano, F.S. Samani, M. Barbieri, "Symmetry breaking and chaos-induced imbalance in planetary gears", *Nonlinear Dynamics*, 80-1, pp. 561-582, 2015.
5. M. Barbieri, A. Zippo, M. Strozzi, L. Serafini, F. Pellicano, G. Bonori, "Dynamic modelling of gear pairs", *Proceedings of the 22nd International Congress On Sound & Vibration, ICSV22, Firenze, 2015.*

Nel corso degli ultimi 5 presso la sezione Meccanica dei sistemi del il Dipartimento di Meccanica abbiamo iniziato una nuova attività riguardo le macchine eoliche, con particolare riferimento alla valutazione del comportamento dinamico e aerodinamico delle macchine ad asse verticale off-shore e allo sviluppo di una macchina ad asse verticale auto-avviante con implementato un sistema di controllo del pitch della singola pala.

La lunga esperienza del gruppo nel progettare e realizzare prove in galleria del vento e la presenza nel gruppo di competenze diversificate ci hanno permesso di affrontare un problema tipicamente interdisciplinare, che coinvolge problemi tipici della meccanica applicata, come la modellazione di sistemi, il controllo, la dinamica dei rotori e l'aerodinamica così come sono coinvolte discipline vicine quali l'elettronica di potenza e l'idrodinamica.

Due finanziamenti nazionali, PRIN 2008 (anno 2012) e fondo 5 per mille del Politecnico (2013), hanno premesso, rispettivamente, di iniziare l'attività sulle macchine offshore e di realizzare il modello di turbina H Darrieus con IPC.

Per quanto riguarda le macchine galleggianti, siamo partiti con la misura delle forze aerodinamiche non stazionarie dovute al movimento della sottostruttura. L'interesse in questo caso è la definizione della spinta in funzione del moto imposto per valutare l'effetto dissipativo dato dalle forze aerodinamiche sul movimento del sistema completo, macchina, sottostruttura galleggiante e linee di ormeggio. Da questo punto di partenza siamo poi passati alla movimentazione Hardware-In-The-Loop a due gradi di libertà, surge e pitch, e grazie ad un finanziamento H2020, progetto LIFES50+, stiamo ora realizzando un robot a cinematica parallela che ci permette di dare 6 gdl al galleggiante controllati in tempo reale calcolando l'idrodinamica al passo di integrazione. Nell'ambito del progetto LIFES50+ è anche stato progettato e realizzato un modello di macchina ad asse verticale basato sulla macchina di riferimento del DTU

La macchina ad asse verticale è stata sviluppata in modo da poter essere provata nella camera veloce della galleria del vento del Politecnico di Milano in configurazione di camera aperta. La macchina è del tipo H-Darrieus ed è caratterizzata dall'aver il controllo indipendente dell'angolo di pitch delle tre ali. Questo la rende ideale per l'implementazione di diverse strategie di controllo con particolare riferimento all'implementazione di logiche atte all'autoavviamento. In parallelo alla progettazione della macchina sono stati sviluppati modelli di calcolo per la predizione del comportamento aerodinamico tenendo conto del controllo. La macchina per le sue caratteristiche ben si presta alla misura delle quantità caratteristiche, in termini di quantità elettriche, meccaniche e alla caratterizzazione della scia. Sfruttando la possibilità di misure in galleria del vento è stato proposto un benchmark internazionale per la validazione di codici di calcolo per le macchine ad asse verticale.



Fig. 1 – Prove in galleria del vento sulla macchina ad asse orizzontale e VAWT H-Darrieus con IPC

1. I.Bayati, S.Gueydon, M.Belloli, "Study of the effect of water depth on potential flow solution of the OC4 Semisubmersible Floating Offshore Wind Turbine", Energy Procedia 80 (2015) 168 – 176
2. I.Bayati, M.Belloli, D.Ferrari, F.Fossati, H.Giberti, "Design of a 6-DoF Robotic Platform for Wind Tunnel Tests of Floating Wind Turbines". Energy Procedia (2014) pp. 313-323.
3. I.Bayati, J.Jonkman, A.Robertson, A.Platt, "The effects of second-order hydrodynamics on a semisubmersible floating offshore wind turbine", Journal of Physics: Conference Series 524 (2014) 01209.
4. S.Gueydon, T.Duarte, J.Jonkman, I.Bayati, A.Sarmento, "Comparison of Second-Order Loads on a Semisubmersible Floating Wind Turbine", NREL NREL/CP-5000-61162.
5. I.Bayati, M.Belloli, S.Foletti, "Multi-Objective Design Of a High-Performance Active Pitch- Controlled H-Darrieus VAWT For Urban Installation", European Wind Energy Association (EWEA), Annual Event 2014, March 10-13, Barcelona, Spain.
6. I.Bayati, M.Belloli, A.Facchinetti, S.Giappino, "Wind Tunnel Tests on Floating Offshore Wind Turbines: A Proposal For Hardware-In-The-Loop Approach To Validate Numerical Codes". Wind Engineering. No.6, Vol.37, PP.557-568, 2013
7. lifes50plus.eu

Alberto Borboni
Università degli Studi di Brescia

Pianificazione di Profili di Moto per Macchine Automatiche

Questa linea di ricerca intende approfondire vari aspetti della pianificazione del moto per macchine automatiche, partendo da una prima fase di progettazione, attraversando una seconda fase di ottimizzazione fino a sperimentare i limiti tecnologici che inibiscono ulteriormente l'incremento di qualità del movimento.

Nella prima fase, la progettazione del moto, si sono approfonditi aspetti legati a varie modalità di definizione del profilo di moto nel diagramma temporale delle accelerazioni, facendo anche ampio uso dei risultati già raggiunti dalla comunità scientifica.

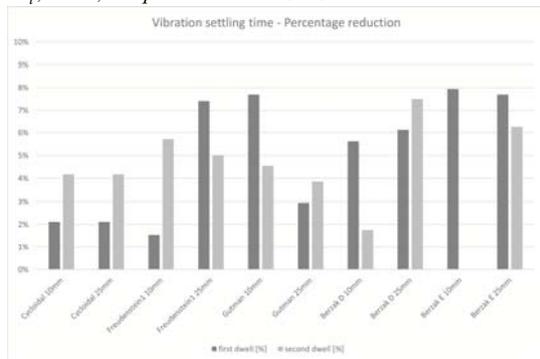
A causa di effetti dinamici, il comportamento di una macchina non è sempre adeguato; pertanto si rende a volte necessario un processo di ottimizzazione del profilo di moto imposto ad uno o più organi della macchina stessa. Esistono diversi approcci, in Fig. 1 (s1) è accennato un metodo che si è sviluppato per la soppressione di una banda di armoniche e per il successivo riaggiustamento del profilo di moto in modo da ridurre l'eccitazione di alcuni fenomeni vibratori. La tecnica sviluppata porta alla semplice soluzione di un sistema lineare (si veda Ref. 1 per approfondimenti).

$$a(t) = \sum_{i=0}^M (\alpha_i \cos(\omega_i t) + \beta_i \sin(\omega_i t))$$

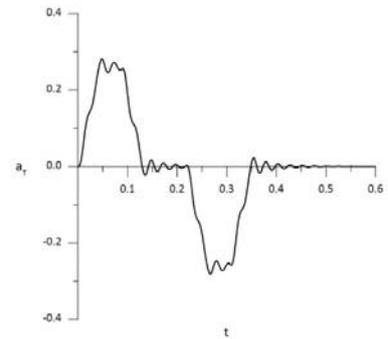
$$a^*(t) = \left(\sum_{o=1}^{r-1} (\alpha_o \cos(\omega_o t) + \beta_o \sin(\omega_o t)) \right) \left(\sum_{p=r}^{r+s-1} (\alpha_p \cos(\omega_p t) + \beta_p \sin(\omega_p t)) \right) + \sum_{q=r+s}^{M-r-s} (\alpha_q \cos(\omega_q t) + \beta_q \sin(\omega_q t))$$

$$\frac{\partial \Delta^*}{\partial \alpha_m} = 0, \quad m = 0, 1, \dots, M; \quad m \neq p_1, p_2, \dots, p_r \quad \frac{\partial \Delta^*}{\partial \beta_m} = 0, \quad m = 0, 1, \dots, M; \quad m \neq p_1, p_2, \dots, p_r$$

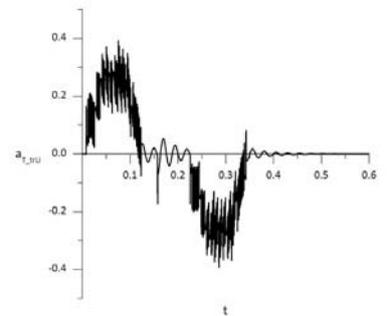
$$u_i = c_i, \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (s1)$$



(s2)



(d1)



(d2)

Fig. 1 - (s1) Metodo di ottimizzazione basato su analisi di Fourier. (s2) Risultati ottenuti in termini di riduzione del tempo di assestamento delle vibrazioni residue (d1) Diagramma delle accelerazioni del cedente di una camma traslante a punteria a rotella in presenza di cedevolezza (d2) Diagramma delle accelerazioni del cedente di una camma traslante a punteria a rotella in presenza di cedevolezza e considerando troncamento numerico e interpolazione del sistema di controllo numerico per la realizzazione del profilo della camma.

Esistono dei limiti a questo tipo di ottimizzazioni, a causa delle condizioni in cui sono effettivamente realizzati tali profili di moto. Ad esempio in Fig. 1 (d2) è rappresentata l'accelerazione di un cedente a punteria a rotella, quando il movente è una camma piana traslante realizzata con un sistema a controllo numerico che accetta un numero limitato di punti per la generazione del profilo e che interpola in tempo reale tali punti tramite un opportuno algoritmo. Si nota una differenza rispetto al comportamento rappresentato in Fig. 1 (d1) realizzato grazie a una simulazione in cui la camma piana traslante è individuata da una linea continua perfettamente equivalente al profilo di moto desiderato.

- Borboni, A. and M. Lancini "Commanded motion optimization to reduce residual vibration," Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME, 2015. 137(3): p. 1-9.
- Borboni, A., Bussola R., Faglia R., Magnani P.L., Menegolo A. "Movement optimization of a redundant serial robot for high-quality pipe cutting," Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2008. 130(8): p. 0823011-0823016.

Daniele Bortoluzzi

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Trento

Dinamica e controllo di sistemi meccanici per applicazioni spaziali

L'attività di ricerca si colloca nell'ambito della missione LISA Pathfinder, sviluppata dall'ESA per verificare le tecnologie critiche per la misura delle onde gravitazionali nella banda di frequenze in cui emettono le sorgenti più intense e prevedibili (10^{-4} - 10^{-1} Hz). La misura delle onde gravitazionali si basa sulla risposta dinamica di una formazione instabile di 6 masse in volo libero in 3 satelliti distanti circa 10^6 km, isolate da forze (per unità di massa) superiori a $3 \times 10^{-15} \text{m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$. In LISA Pathfinder si verifica un sistema limitato ad un satellite e due masse, controllate dal LISA Technology Package (LTP, Fig.1 sinistra) e con un requisito rilassato di un ordine di grandezza.

Gli aspetti più critici del LTP sono relativi all'instabilità delle masse, causata da gradienti positivi dei campi gravitazionale ed elettro-magnetico del satellite, e dalla limitata autorità del sistema di controllo capacitivo delle masse (circa 1mN su masse di 2kg). In fase di formulazione della missione si è contribuito alla definizione dell'architettura del satellite, sviluppando il modello multibody della dinamica del sistema masse-satellite ed il modello dei disturbi in forza, applicandolo alla definizione dei modi operativi ed all'allocazione dei requisiti di sistema e sottosistema relativamente al bilancio globale di disturbo in forza [1]. Tale bilancio ha permesso di definire le specifiche per i disturbi in forza dei vari sottosistemi del LTP recepiti nei successivi bandi di gara aperti dall'ESA. Partendo dai requisiti scientifici si è proceduto alla definizione e progettazione del sistema di controllo di posizione ed assetto di tipo drag-free, finalizzato alla stabilizzazione del sistema e compensazione dei disturbi [2]. In fase di implementazione della missione, si è contribuito alla verifica della funzionalità e delle prestazioni del meccanismo di centraggio e rilascio della massa di prova (Grabbing Positioning and Release Mechanism, GPRM, Fig. 1 centro). Questo meccanismo è progettato per controllare la massa di prova in modalità non scientifica e per rilasciarla in volo libero con limitate velocità lineari ed angolari. Uno dei possibili contributi di velocità al rilascio è l'adesione tra le superfici della massa e del meccanismo, che esercita una forza alla ritrazione del vincolo. Si è progettato e realizzato un esperimento per la misura di piccoli impulsi (Transferred Momentum Measurement Facility, Fig. 1 destra) mediante il quale si è caratterizzata la forza di adesione e l'impulso sviluppato, sia su modelli rappresentativi che sul modello di qualifica del meccanismo GPRM [3]. In parallelo si è sviluppato il modello elettro-meccanico della dinamica del meccanismo di rilascio, al fine di simulare la fase di rilascio in volo sulla base dei risultati dei test di qualifica [4].

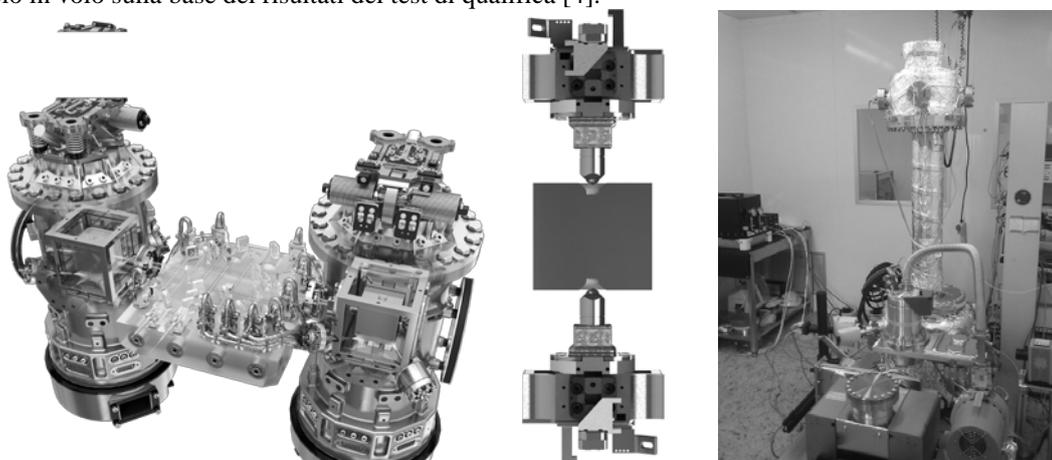


Fig. 1 – il LISA Technology Package (sinistra), il Grabbing Positioning and Release Mechanism (centro) e la Transferred Momentum Measurement Facility (destra)

Il satellite è stato lanciato il 3 dicembre 2015 e le masse di prova sono state rilasciate con successo il 15 e 16 febbraio 2016, permettendo di iniziare la fase scientifica l'8 marzo 2016. Il 7 giugno 2016 si è comunicato che le prestazioni di LISA Pathfinder hanno permesso di raggiungere un livello di disturbo in accelerazione migliore del requisito e praticamente al livello richiesto dalla missione LISA [5].

Lavori più rappresentativi:

1. M. Da Lio, D. Bortoluzzi, S. Vitale, Multibody model for spacecraft drag-free control of the laser interferometer space antenna technology demonstration mission smart - 2. Space Technology, vol. 24, p. 57-72, ISSN: 0892-9270, 2004
2. W. Fichter, P. Gath, S. Vitale, D. Bortoluzzi, LISA pathfinder drag-free control and system implications. Classical and Quantum Gravity, vol. Vol. 22, p. S139-S148, ISSN: 0264-9381, doi: 10.1088/0264.9381.22.10.002, 2005
3. D. Bortoluzzi, C. Zanoni, S. Vitale, Improvements in the measurement of metallic adhesion dynamics. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 52-53, Issue 1, 2015, 600-613
4. C. Zanoni, D. Bortoluzzi Experimental-Analytical Qualification of a Piezoelectric Mechanism for a Critical Space Application, IEEE Transactions on Mechatronics, 2014
5. M. Armano et al. Sub-Femto-g Free Fall for Space-Based Gravitational Wave Observatories: LISA Pathfinder Results. Physical Review Letters 116, 231101, 2016

Paolo Boscariol

Università di Udine, DIEGM (2008-2015) – Università di Padova, DTG (dal 2016)

Pianificazione del moto di meccanismi con elasticità concentrate o distribuite

L'attività di ricerca ha lo scopo di sviluppare metodologie per la pianificazione di leggi di moto per sistemi meccanici tramite un approccio basato su modello. La ricerca è stata orientata in particolare alla definizione del moto punto-punto di meccanismi a membri deformabili o con elasticità concentrata ai giunti.

La pianificazione del moto è basata su un approccio variazionale, ovvero sfrutta la definizione e la soluzione di problemi TPBVP (Two-Point Boundary Value Problem): dato un sistema meccanico il cui modello dinamico nonlineare è esprimibile in forma ODE, è possibile definire una legge di moto ottima tramite la soluzione numerica del problema di ottimizzazione associato, derivato utilizzando il principio del minimo di Pontryagin (PMP). Una significativa applicazione di tale approccio ha permesso di definire traiettorie a jerk vincolato per manipolatori a membri flessibili in grado di ridurre notevolmente l'insorgenza di fenomeni vibratori rispetto a leggi tradizionali; questa attività ha tratto vantaggio da pluriennali studi condotti parallelamente sulla dinamica di questa tipologia di meccanismi. In Fig.1 si riporta, a titolo di esempio, la schematizzazione di un manipolatore piano analizzato e della procedura di pianificazione, insieme ad un percorso pianificato e ad un diagramma che dimostra l'efficacia delle tecniche proposte nel ridurre i fenomeni vibratori nel meccanismo.

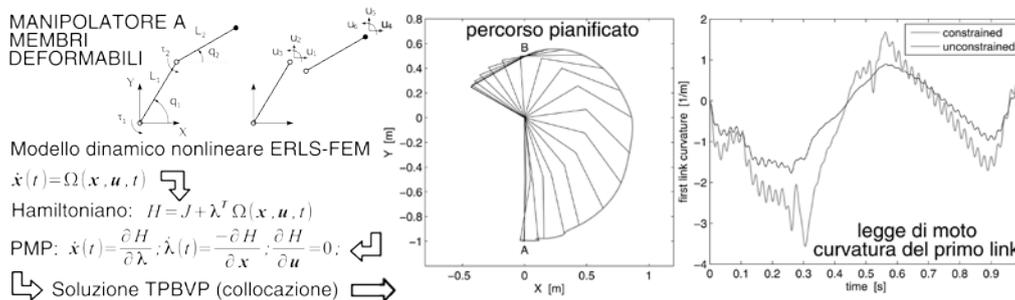


Fig. 1 – Pianificazione di leggi di moto per meccanismi a membri deformabili

I risultati ottenuti sono stati estesi per ovviare alla limitata robustezza che caratterizza questo tipo di approcci: le prestazioni si riducono infatti notevolmente in presenza di dinamiche non modellate o di scostamenti dei parametri del modello rispetto ai valori nominali. Si è dimostrato che un notevole incremento della robustezza parametrica è ottenibile aumentando il problema di ottimizzazione nonlineare includendo anche le funzioni di sensitività del sistema, ovvero le derivate parziali dello stato del sistema rispetto ai parametri incerti. Di particolare rilievo è stata l'applicazione di questo approccio ad un sistema a 2 gradi di libertà con giunto elastico: l'imposizione di vincoli ai valori assunti dalle funzioni di sensitività nei punti estremi della traiettoria ha permesso di ridurre le vibrazioni residue in presenza di perturbazioni della costante elastica del giunto, come mostrato in Fig. 2.

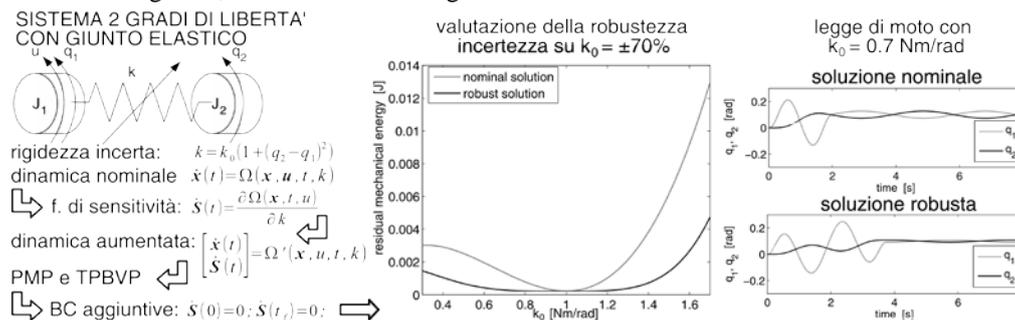


Fig. 2 – Pianificazione robusta di traiettorie per un sistema a due gradi di libertà con giunto elastico

Attuali sviluppi dell'attività di ricerca stanno riguardando la sistematica validazione sperimentale delle tecniche sviluppate, ed il confronto con tecniche di input-shaping robuste, oltre che lo sviluppo di innovative tecniche di pianificazione del moto per la riduzione dei consumi energetici nelle macchine automatiche.

Lavori più rappresentativi:

1. P. Boscariol, A. Gasparetto "Model-based trajectory panning for flexible link mechanisms with bounded jerk", Robotics and Computer Integrated Manufacturing 29 (2013), pp. 90-99
2. P. Boscariol, A. Gasparetto "Robust model-based trajectory planning for nonlinear systems", Journal of Vibration and Control, published online (2015)
3. P. Boscariol, A. Gasparetto "Optimal trajectory planning for nonlinear systems: robust and constrained solutions", Robotica 34, pp. 1243-1259 (2016)

Giovanni Bracco

POLITECNICO DI TORINO

OFFSHORE RENEWABLE ENERGY

L'attività di ricerca svolta nel campo dell'Offshore Renewable Energy presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale del Politecnico di Torino, sotto la guida della Prof. Giuliana Mattiazzo, riguarda la modellizzazione e la sperimentazione di sistemi di energia rinnovabile marina. Le attività di ricerca si dividono nei seguenti filoni:

- Energia da moto ondoso (Wave Energy): la ricerca riguarda lo sviluppo di convertitori di energia da moto ondoso, in particolare il sistema ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) che utilizza gli effetti giroscopici per trasformare l'energia delle onde marine in energia elettrica. La ricerca è iniziata dal livello TRL 1 di concept fino a giungere al livello TRL 6 con la progettazione, realizzazione, installazione e connessione alla rete elettrica di un sistema ISWEC con potenza nominale 60 kW presso l'Isola di Pantelleria. In parallelo è in fase di sviluppo il convertitore a massa oscillante PEWEC (Pendulum Wave Energy Converter), validato sperimentalmente in bacino ondoso in scala 1:12 e attualmente in fase di progetto del sistema in scala reale. Le competenze sviluppate sono ad ampio spettro: stima della risorsa ondosa, modellazione dinamica nel tempo e in frequenza di sistemi WEC, sperimentazione in scala in bacino ondoso, ottimizzazione del convertitore e delle leggi di controllo, analisi di sopravvivenza in condizioni marine estreme.
- Energia eolica marina (Offshore Wind Energy): attività di ricerca su sistemi eolici galleggianti o ibridi eolici + ondosi. Attività di modellazione matematica, prototipazione e sperimentazione in galleria del vento e in ambiente reale. Attività parallele riguardano l'integrazione di sistemi EES (Electric Energy Storage) con i sistemi a energia rinnovabile al fine di mitigarne la variabilità e di permetterne l'integrazione in smart grid.

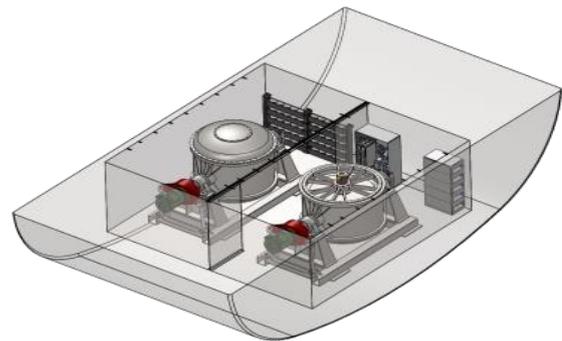


Fig. 1 – Il sistema ISWEC presso l'Isola di Pantelleria (a sinistra) e 3D rendering (a destra).



Fig. 2 – Il sistema PEWEC presso il bacino ondoso CNR INSEAN di Roma (a sinistra) e il prototipo PIGAL (Piattaforma Galleggiante) di sistema eolico offshore (a destra).

1. 2016, Sirigu S. A., Vissio G., Bracco G., Giorcelli E., Passione B., Raffero M., Mattiazzo G., ISWEC Design Tool, International Journal of Marine Energy, Available online 23 April 2016, ISSN 2214-1669. DOI: 10.1016/j.ijome.2016.04.011.
2. 2015, Cagninei A., Raffero M., Bracco G., Giorcelli E., Mattiazzo G., Poggi D., Productivity analysis of the full scale inertial sea wave energy converter prototype: A test case in Pantelleria Island, Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 7 n. 6, 061703-. - ISSN 1941-7012. DOI: 10.1063/1.4936343.
3. 2014, Raffero M., Martini M., Passione B., Mattiazzo G., Giorcelli E., Bracco G. Stochastic Control of Inertial Sea Wave Energy Converter. In: THE SCIENTIFIC WORLD JOURNAL, vol. Volume 2015. - ISSN 1537-744X. DOI: 10.1155/2015/980613.
4. 2011, Bracco G., Giorcelli E., Mattiazzo G., ISWEC: A gyroscopic mechanism for wave power exploitation, Mechanism and Machine Theory, pp. 14, 2011, ISSN: 0094-114X, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2011.05.012.

Renato Brancati
Università di Napoli Federico II
Isolatori smart basati sull'uso di gomme magnetoreologiche.

Cabinet e shelter vengono usati per l'alloggiamento di elementi elettro-meccanici ed elettronici di alta tecnologia che hanno un ruolo fondamentale in molti settori o in aree di interesse civile (ad esempio dispositivi salvavita negli ospedali) e che sono spesso collocati in ambienti operativi ostili.

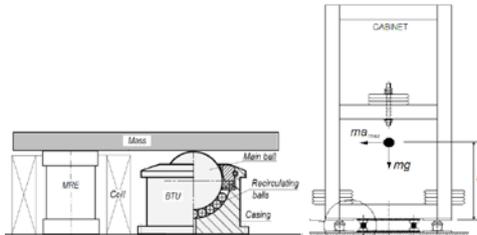


Fig. 1 - Schema isolatore e cabinet su sospensione MRE

Suddetti dispositivi devono essere protetti contro le vibrazioni in quanto devono operare in ogni condizione, anche durante un evento sismico. Lo studio riguarda: la modellazione, la progettazione, la realizzazione e la verifica sperimentale delle prestazioni di un isolatore “smart” che utilizza gomme magnetoreologiche (MRE). Un isolatore MRE è un dispositivo complesso nel quale la gomma rappresenta solo una componente, infatti è presente un circuito magnetico, un sistema di alimentazione ed un sistema di controllo.

Gomma MR. Le gomme MRE sono composti da particelle magnetiche annegate in una matrice di gomma o gel. Hanno la proprietà di modificare la propria rigidezza al variare dell'intensità del campo magnetico in cui sono immersi.

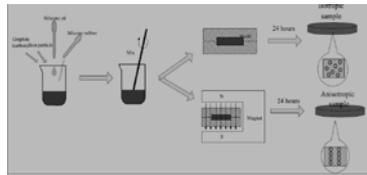


Fig. 2 -Schema processo fabbricazione di una gomma magnetoreologica

Circuito Magnetico. Una bobina viene utilizzata per generare il campo magnetico controllabile. L'ottimizzazione del circuito magnetico permette di ottenere il maggior effetto magnetoreologico con minore corrente e dissipazione.

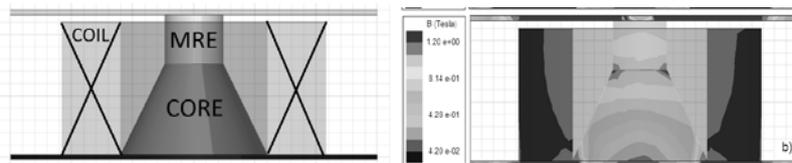


Fig. 3 -Isolatore MRE e modello FEM intensità campo magnetico

Modello matematico, algoritmi di controllo, verifica sperimentale. Per sviluppare gli algoritmi di controllo del sistema di isolamento è indispensabile dotarsi di un modello matematico che tenga conto delle caratteristiche viscoelastiche della gomma, della dipendenza dal campo magnetico, e della dipendenza del campo dalla corrente. Il controllo, sviluppato in collaborazione con studiosi del settore, sfrutterà l'innovativo approccio “ottimo-adattativo”. Il sistema di isolamento verrà testato con il “banco prova isolatori” di cui è dotato il Dipartimento.

1. Brancati, R. , Di Massa, G. , Pagano, S. , Strano, S. “A Seismic Isolation System for Lightweight Structures based on MRE Devices” Lecture Notes in Engineering and Computer Science, World Congress on Engineering, WCE 2015; London; United Kingdom; 1-3 July, 2015, ISBN: 978-988-14047-0-1

2. Brancati, R. , Di Massa, G. , Pagano, S. “A vibration isolator based on magneto-rheological elastomer” 1st IFToMM ITALY Conference December 1-2, 2016 - Vicenza, Italy

Luca Bruzzone
Università degli Studi di Genova

Mantis: robot mobile di sorveglianza a locomozione ibrida

A livello globale il mercato della robotica di servizio, ed in particolare il settore della robotica mobile di sorveglianza, sono in una fase di fortissima espansione. Pertanto, lo sviluppo di sistemi di locomozione con elevata mobilità in ambienti non strutturati è un'area di ricerca estremamente interessante. Mentre la locomozione su ruote massimizza velocità ed efficienza energetica, quella su zampe fornisce le migliori capacità di superamento ostacoli. La locomozione ibrida su ruote e zampe, soprattutto per robot di taglia medio/piccola, riesce a coniugare i vantaggi dei due sistemi, contenendo nel contempo la complessità meccanica e di controllo. Esistono in letteratura diversi approcci per realizzare la locomozione ibrida su ruote e zampe, tra cui la *stepping triple wheel* (Spacecat, Epi.q) e le zampe rotanti (RHex, WHegs, Loper).

In questo contesto di ricerca è stato ideato e sviluppato il robot Mantis, caratterizzato da un corpo anteriore (Fig. 1, *ca*) dotato di due ruote motrici (*rm*) attuate indipendentemente, e di due zampe (*z*) simili a quelle di una mantide religiosa, anch'esse attuate indipendentemente. Il retrotreno (*rt*) è invece passivo, con due gradi di libertà che permettono alle ruote folli posteriori (*rp*) di adeguarsi alle irregolarità del terreno.

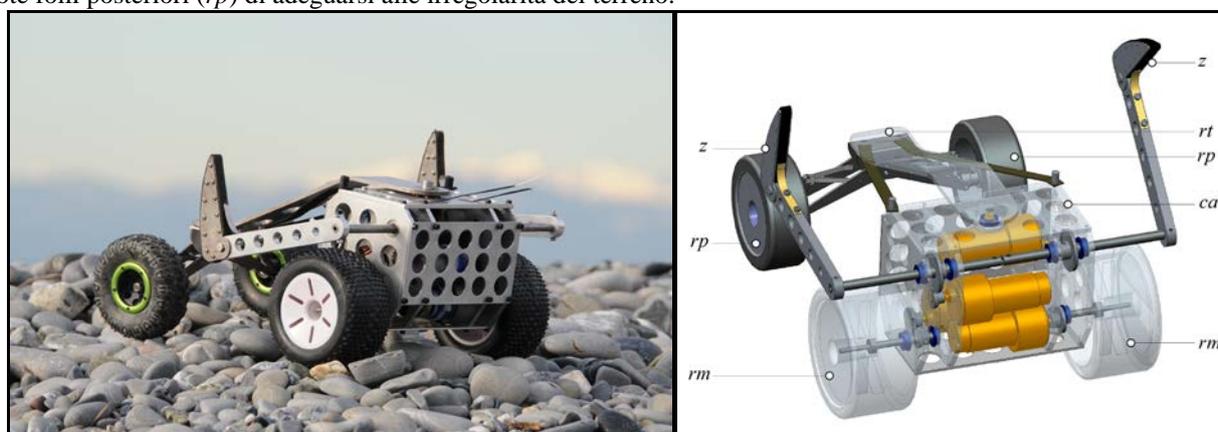


Fig. 1 – Il robot mobile a locomozione ibrida Mantis

Il profilo delle zampe è stato studiato specificamente per il superamento di gradini, che avviene artigliandone la parte superiore (Fig. 2, *a₁*), sollevando il corpo del robot (Fig. 2, *a₂*), per disimpegnarsi infine rotolando sulla parte esterna delle zampe stesse (Fig. 2, *a₃-a₄*). Oltre che per il superamento di gradini e scale, le zampe possono essere utilizzate per aumentare la trazione su terreni e ostacoli irregolari (Fig. 2, *b₁-b₄*). Su terreni regolari e compatti, la locomozione è invece solo su ruote, quindi con elevata autonomia operativa e senza oscillazioni nella visione.

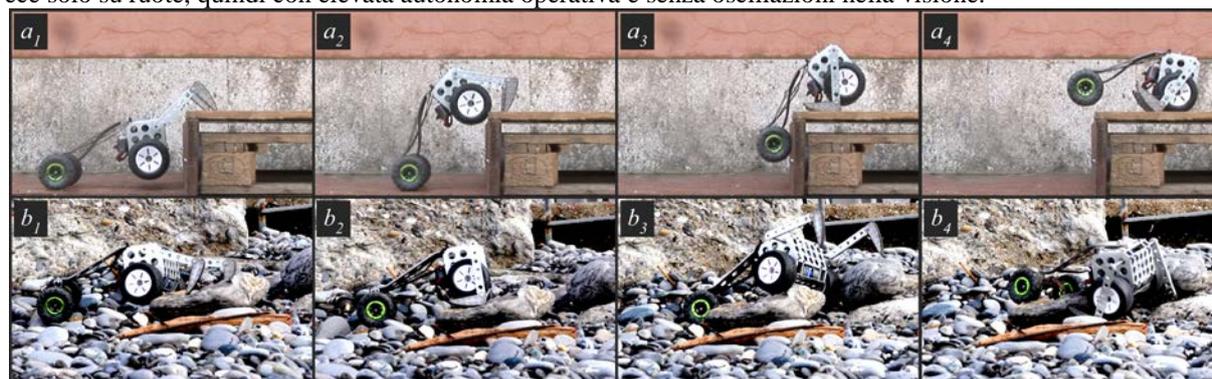


Fig. 2 – Sequenza di salita di un gradino (*a₁-a₄*) e di locomozione su terreno irregolare (*b₁-b₄*)

Lavori più rappresentativi:

1. Luca Bruzzone "Design of the Hybrid Leg-Wheel Robot MANTIS," Proc. of the 21st Intl. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD 2012, Napoli, 2012, pp. 114-120.
2. Luca Bruzzone, Pietro Fanghella "Mantis: Hybrid Leg-Wheel Ground Mobile robot," Industrial Robot, 41(1), 2014, pp. 26-36.
3. Luca Bruzzone, Pietro Fanghella "Mantis Hybrid Leg-Wheel Robot: Stability Analysis and Motion Law Synthesis for Step Climbing," Proc. of MESA 2014, 10th IEEE/ASME Intl. Conf. on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Senigallia, 2014. **Best Paper Award in Robotics Systems.**
4. L. Bruzzone, P. Fanghella, "Functional Redesign of Mantis 2.0, a Hybrid Leg-Wheel Robot for Surveillance and Inspection," Journal of Intelligent & Robotic Systems, 81, 2016, pp. 215-230.

Marco Cammalleri
Università di Palermo

Frequenze naturali di cilindri a parete sottile e bordi incastrati

Questa breve relazione presenta i risultati di una ricerca riguardante il problema delle vibrazioni dei cilindri a parete sottile e bordi incastrati. L'obiettivo principale non era tanto quello di studiare il modo di vibrare di questi elementi, poiché già piuttosto noto, ma di formulare un nuovo modello matematico per calcolarne le frequenze proprie. Non c'erano infatti modelli in letteratura che fossero allo stesso tempo accurati e semplici da utilizzare. I modelli accurati richiedevano complesse tecniche numeriche di risoluzione, quelli analitici non erano accurati abbastanza (errori massimi dell'ordine del 40% per i modelli analitici più precisi). Il nuovo modello sviluppato, note le caratteristiche geometriche e meccaniche del cilindro, fornisce le frequenze naturali attraverso una sequenza di equazioni algebriche esplicite. Tuttavia, dal confronto con dati numerici e sperimentali di letteratura, risulta uno scarto massimo, rispetto alla soluzione esatta, inferiore al 10% per tutti i modi di vibrare comparabili e meno del 5% sulla frequenza più bassa, rispetto ai dati sperimentali. Si candida quindi ad essere uno strumento ideale per gli ingegneri che devono progettare elementi ad essi assimilabili.

L'equazione delle frequenze è stata ottenuta combinando le equazioni di equilibrio indefinite classiche (versione di Reissner della teoria di Love con le assunzioni di Donnell), il principio di Hamilton ed una appropriata costruzione delle autofunzioni (Fig.1). Quest'ultime, in particolare, sono state formulate partendo dall'osservazione che la forma delle onde circolari non dipende dalle condizioni al contorno mentre quella delle semionde longitudinali sì e somiglia alle vibrazioni flessionali delle travi soggette agli stessi vincoli. Pertanto è stata assegnata allo spostamento radiale una autofunzione del tipo $u_r = A_r f_r(x) \cos(n\theta) \cos(\omega t)$, con $f_r(x)$ simile all'autofunzione della trave soggetta agli stessi vincoli (in realtà sono state utilizzate due autofunzioni differenti per le semionde pari e per quelle dispari al fine di rendere più agevole le manipolazioni matematiche successive). Le autofunzioni relative agli spostamenti assiali u_x e tangenziali u_s sono state ricavate invece imponendo la mutua ortogonalità tra le autofunzioni. Mediante le equazioni di equilibrio indefinite di Reissner e le autofunzioni prima definite è stato quindi calcolato il lavoro virtuale sull'elemento infinitesimo, poi sull'intero volume ed infine si è imposta la stazionarietà dell'azione di Hamilton. In questo modo, dopo varie manipolazioni matematiche, si è pervenuti ad una equazione della frequenza le cui costanti dipendono esclusivamente e direttamente dalle proprietà geometriche e meccaniche del cilindro.

Sulla scorta di questa procedura è già stato sviluppato un altro modello più generale valido per le più comuni condizioni di vincolo. Allo stato, esso è ancora in fase di validazione.

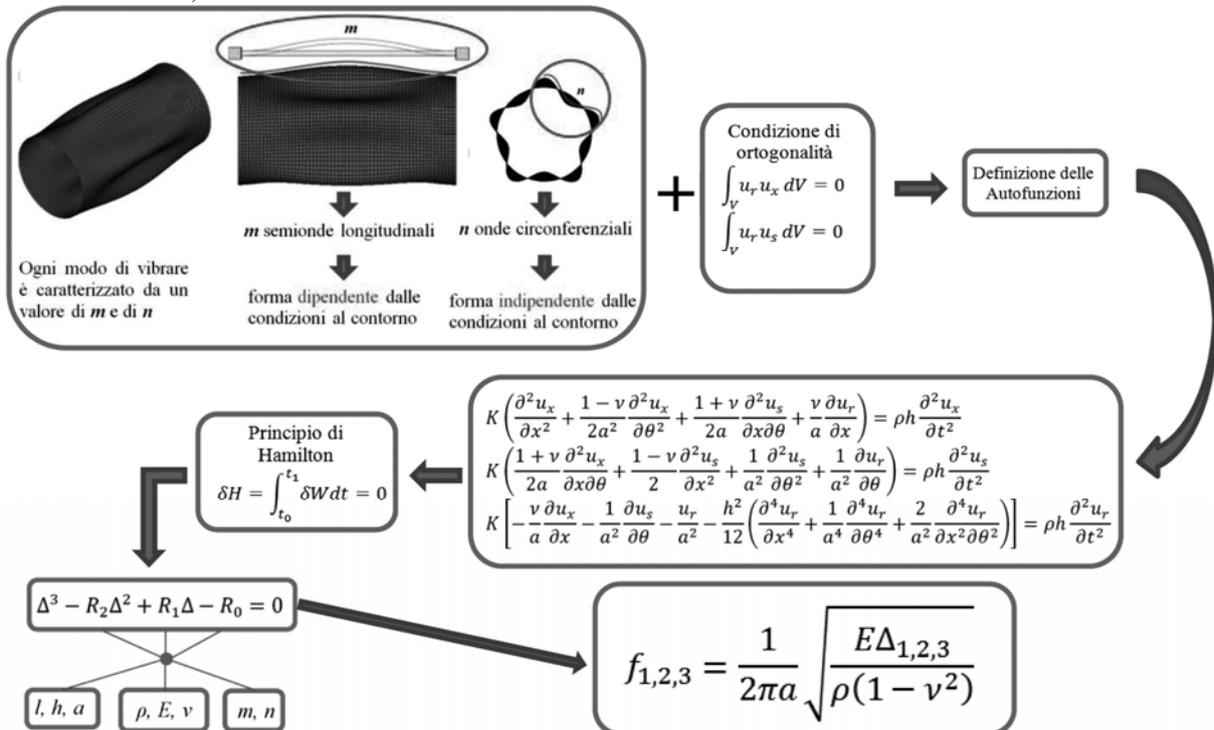


Fig. 1 – Diagramma di flusso del modello.

Lavori più rappresentativi:

1. Cammalleri M., Costanza A., "A Closed-Form Solution for Natural Frequencies of Thin Walled Cylinders with Clamped Edges", International Journal of Mechanical Sciences, Volume 110, May 2016, Pages 116–126, Elsevier, Doi: 10.1016/j.ijmeccsci.2016.03.005

Luca Carbonari
Università Politecnica delle Marche
Macchine riconfigurabili a cinematica parallela

Un robot riconfigurabile è una macchina capace di modificare la mobilità del suo terminale attraverso una variazione locale della propria struttura cinematica. Tale riconfigurazione può essere ottenuta attraverso una vera e propria modifica della struttura del robot o, alternativamente, attraverso il passaggio per configurazioni singolari che consentano ad esso di guadagnare gradi di mobilità. Tra le macchine che presentano caratteristiche di riconfigurabilità, le macchine parallele a mobilità ridotta con architettura 3-CPU possiedono la singolare capacità di permettere cambi di mobilità, da moti elementari (moto piano, pura traslazione, pura rotazione) a moti più complessi (moti accoppiati). La medesima architettura, infatti, ha permesso in passato di realizzare i prototipi di due macchine con caratteristiche di mobilità duali: I.Car.Ro. (fig.1.a), robot cartesiano per moti di pura traslazione, e Sphe.I.Ro. (fig.1.b), polso sferico a cinematica parallela, che differiscono a livello cinematico solo per la mutua disposizione dei giunti all'interno della struttura di gamba.



Fig. 1 – (a) I.Car.Ro.: robot 3-CPU di pura traslazione; (b) Sphe.I.Ro.: polso sferico 3-CPU.

Per queste macchine, una piccola variazione del giunto che connette le gambe al terminale è sufficiente a modificarne radicalmente la mobilità, che si modifica da puramente traslazionale a puramente rotazionale. Al fine di sfruttare questa peculiarità, è stato progettato un apposito giunto sferico riconfigurabile (fig.2.b). Una variazione in modalità automatica della configurazione del giunto genera due diversi giunti universali, ognuno associato ad una delle due differenti mobilità della piattaforma mobile del 3-CPU (fig.2.a).

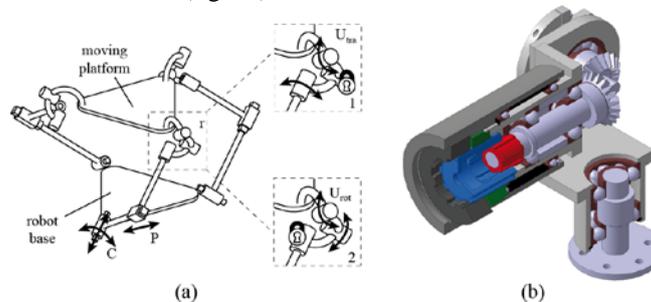


Fig. 2 – (a) piattaforma 3-CPU riconfigurabile e (b) giunto sferico riconfigurabile.

Da un punto di vista formale, è stato inoltre dimostrato che l'architettura 3-CPU è in grado di esibire molti altri tipi di comportamento cinematico. L'analisi delle equazioni di vincolo, scritte attraverso l'algebra dei polinomi ed analizzate con strumenti propri di quelle strutture matematiche (basi di Groebner, decomposizione primaria degli Ideali) ha identificato in 15 le diverse tipologie di movimento concesse dai robot ad architettura 3-CPU, ciascuna raggiungibile attraverso il passaggio per differenti spazi di singolarità. L'analisi della cinematica differenziale ha infine esteso i risultati ottenuti per la classe 3-CPU anche ad altre catene cinematiche in grado di esibire comportamenti analoghi. Tale risultato è stato ottenuto generalizzando la mobilità concessa dalle singole gambe, localmente analizzata con strumenti appropriati come l'algebra di Lee e la teoria degli Screw.

Lavori più rappresentativi:

1. Carbonari, L., Callegari, M., Palmieri, G., Palpacelli, M.-C. "A new class of reconfigurable parallel kinematic machines" (2014) *Mechanism and Machine Theory*, 79, pp. 173-183.
2. Carbonari, L., Callegari, M., Palmieri, G., Palpacelli, M.-C. "Analysis of kinematics and reconfigurability of a spherical parallel manipulator" (2014) *IEEE Transactions on Robotics*, 30 (6), art. no. 6912002, pp. 1541-1547
3. Palpacelli, M.-C., Carbonari, L., Palmieri, G., Callegari, M. "Analysis and Design of a Reconfigurable 3-DoF Parallel Manipulator for Multimodal Tasks" (2015) *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20 (4), art. no. 6960887, pp. 1975-1985.
4. Palpacelli, M.-C., Carbonari, L., Palmieri, G. "Details on the Design of a Lockable Spherical Joint for Robotic Applications" (2016) *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 81 (2), pp. 169-179.
5. Palpacelli, M., Carbonari, L., Palmieri, G., Callegari, M. "Mobility analysis of non-overconstrained reconfigurable parallel manipulators with 3-CPU/3-CRU kinematics" (2016) *Mechanisms and Machine Science*, 36, pp. 189-200.

Luca Carbonari
Università Politecnica delle Marche
Macchine riconfigurabili a cinematica parallela

Un robot riconfigurabile è una macchina capace di modificare la mobilità del suo terminale attraverso una variazione locale della propria struttura cinematica. Tale riconfigurazione può essere ottenuta attraverso una vera e propria modifica della struttura del robot o, alternativamente, attraverso il passaggio per configurazioni singolari che consentano ad esso di guadagnare gradi di mobilità. Tra le macchine che presentano caratteristiche di riconfigurabilità, le macchine parallele a mobilità ridotta con architettura 3-CPU possiedono la singolare capacità di permettere cambi di mobilità, da moti elementari (moto piano, pura traslazione, pura rotazione) a moti più complessi (moti accoppiati). La medesima architettura, infatti, ha permesso in passato di realizzare i prototipi di due macchine con caratteristiche di mobilità duali: I.Car.Ro. (fig.1.a), robot cartesiano per moti di pura traslazione, e Sphe.I.Ro. (fig.1.b), polso sferico a cinematica parallela, che differiscono a livello cinematico solo per la mutua disposizione dei giunti all'interno della struttura di gamba.



Fig. 1 – (a) I.Car.Ro.: robot 3-CPU di pura traslazione; (b)Sphe.I.Ro.: polso sferico 3-CPU.

Per queste macchine, una piccola variazione del giunto che connette le gambe al terminale è sufficiente a modificarne radicalmente la mobilità, che si modifica da puramente traslazionale a puramente rotazionale. Al fine di sfruttare questa peculiarità, è stato progettato un apposito giunto sferico riconfigurabile (fig.2.b). Una variazione in modalità automatica della configurazione del giunto genera due diversi giunti universali, ognuno associato ad una delle due differenti mobilità della piattaforma mobile del 3-CPU (fig.2.a).

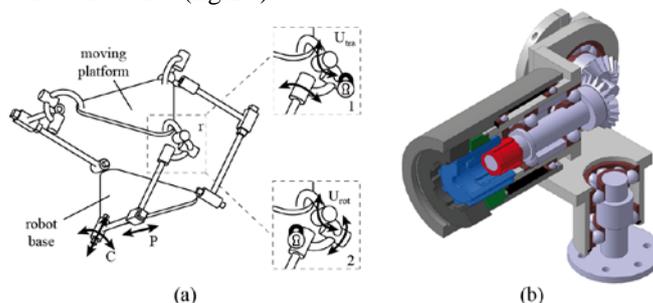


Fig. 2 – (a) piattaforma 3-CPU riconfigurabile e (b) giunto sferico riconfigurabile.

Da un punto di vista formale, è stato inoltre dimostrato che l'architettura 3-CPU è in grado di esibire molti altri tipi di comportamento cinematico. L'analisi delle equazioni di vincolo, scritte attraverso l'algebra dei polinomi ed analizzate con strumenti propri di quelle strutture matematiche (basi di Groebner, decomposizione primaria degli Ideali) ha identificato in 15 le diverse tipologie di movimento concesse dai robot ad architettura 3-CPU, ciascuna raggiungibile attraverso il passaggio per differenti spazi di singolarità. L'analisi della cinematica differenziale ha infine esteso i risultati ottenuti per la classe 3-CPU anche ad altre catene cinematiche in grado di esibire comportamenti analoghi. Tale risultato è stato ottenuto generalizzando la mobilità concessa dalle singole gambe, localmente analizzata con strumenti appropriati come l'algebra di Lee e la teoria degli Screw.

Lavori più rappresentativi:

1. Carbonari, L., Callegari, M., Palmieri, G., Palpacelli, M.-C. "A new class of reconfigurable parallel kinematic machines" (2014) *Mechanism and Machine Theory*, 79, pp. 173-183.
2. Carbonari, L., Callegari, M., Palmieri, G., Palpacelli, M.-C. "Analysis of kinematics and reconfigurability of a spherical parallel manipulator" (2014) *IEEE Transactions on Robotics*, 30 (6), art. no. 6912002, pp. 1541-1547
3. Palpacelli, M.-C., Carbonari, L., Palmieri, G., Callegari, M. "Analysis and Design of a Reconfigurable 3-DoF Parallel Manipulator for Multimodal Tasks" (2015) *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20 (4), art. no. 6960887, pp. 1975-1985.
4. Palpacelli, M.-C., Carbonari, L., Palmieri, G. "Details on the Design of a Lockable Spherical Joint for Robotic Applications" (2016) *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 81 (2), pp. 169-179.
5. Palpacelli, M., Carbonari, L., Palmieri, G., Callegari, M. "Mobility analysis of non-overconstrained reconfigurable parallel manipulators with 3-CPU/3-CRU kinematics" (2016) *Mechanisms and Machine Science*, 36, pp. 189-200.

Giuseppe Carbone
 Università di Cassino e del Lazio Meridionale
LARMbot: a new humanoid robot with parallel mechanisms

Il Laboratorio di Robotica e Meccatronica (LARM) è stato istituito nel 1990 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cassino. Le finalità delle attività del LARM sono lo sviluppo di esperienze e conoscenze per la formazione, la ricerca e la consulenza tecnico-scientifica nei settori dell'Automazione e della Robotica nell'ambito della Ingegneria Meccanica. Tra le varie linee di ricerca, particolare attenzione è stata focalizzata sui robot a basso costo e sui robot ad architettura parallela. Questa linea di ricerca combina queste due tematiche nello sviluppo di un robot umanoide a basso costo, utilizzando architetture parallele per il tronco e le gambe, come mostrato ad esempio in Fig.1.

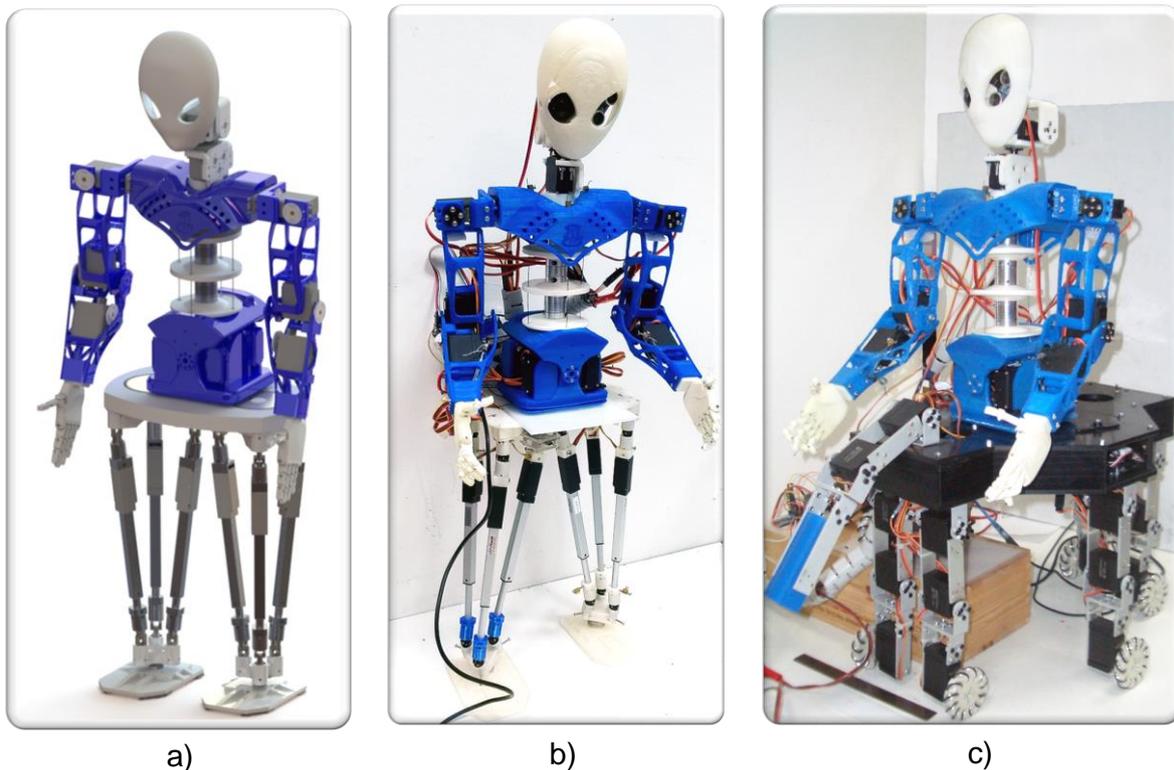


Fig. 1 –LARMbot: a) un modello CAD 3D; b) un prototipo in versione bipede; c) un prototipo in versione centauro (in combinazione con Cassino Hexapod II).

Lavori più rappresentativi:

1. Carbone G., Ceccarelli M., Takanishi A., Lim H.O., "A Study of Feasibility for a Low-Cost Humanoid Robot", IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots HUMANOIDS 2001, Tokyo, pp.351-358, 2001.
2. Carbone G., Lim H.O., Takanishi A., Ceccarelli M., "Stiffness Analysis of the Humanoid Robot WABIAN-RIV", Mechanism and Machine Theory, vol.41, n.1, pp.17-40, 2006.
3. Carbone G., Lihang C., Ceccarelli M., "Using parallel architectures for humanoid robots", IGM-Kolloquium Getriebetechnik, Aachen, pp.177-189, 2009.
4. Cafolla D., Wang M., Carbone G., Ceccarelli M., "LARMbot: A new humanoid robot with parallel mechanisms", XXI CISM-IFTOMM SYMPOSIUM on Theory and Practice of Robots and Manipulators ROMANSY 2016, Udine, 2016.

Massimiliana Carello
Politecnico di Torino
Veicoli elettrici e ibridi innovativi

L'attività di ricerca si è sviluppata nel campo dei veicoli innovativi elettrici e ibridi, anche ai fini della riduzione dei consumi di combustibile.

In essa sono sempre presenti, e fortemente integrate, attività di: impostazione progettuale della trazione elettrica, termica o a idrogeno, modellazione e controllo; modellazione di componenti automotive in materiale composito, tenendo presente la funzione di integrazione con la dinamica del veicolo ai fini di migliorare le performance (sia per confort che per handling); modellazione energetica completa del sistema veicolo; impostazione, studio e ottimizzazione dell'aerodinamica di veicoli in galleria virtuale, prove in galleria del vento per la correlazione matematica dei modelli CFD sviluppati; realizzazione di prototipi di sistemi, di veicoli in scala ridotta e di veicoli full scale per la validazione dei modelli sperimentali e la realizzazione di prove strumentate; modellazione multibody per lo studio della dinamica del veicolo, confort, handling; modellazione e validazione sperimentale NVH di componenti strutturali in materiale composito; modellazione energetica di powertrain elettrici e ibridi.

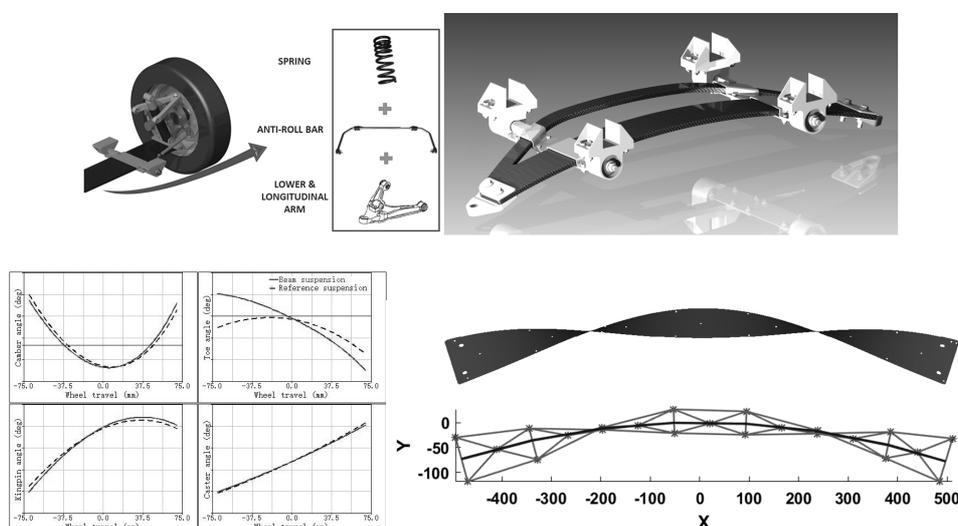


Fig. 1 – Sistema sospensivo: progettazione, simulazione FEM, dinamica veicolo e analisi NVH

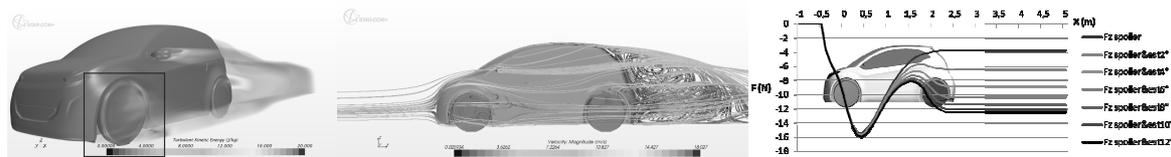


Fig. 2 – Analisi aerodinamica

Lavori più rappresentativi:

1. M. Carello, P. Bonansea, M. D'Auria, "Driveline Optimization for a Hybrid Electric vehicle to Minimize Fuel Consumption", SAE International Conference, Detroit, 08-10 April 2014, doi n. 10.4271/2014-01-1090.
2. M. Carello, A. Ferraris, A. Airale, F. Fuentes, "City Vehicle XAM 2.0: Design and Optimization of its Plug-In E_REV Powertrain", SAE International Conference, Detroit, 08-10 April 2014, doi n. 10.4271/2014-01-1822.
3. M. Carello, A. Ferraris, A. Airale, "City Vehicle XAM 2.0: Design and Optimization of the Composite Suspension System", SAE International Conference, Detroit, 08-10 April 2014, doi n. 10.4271/2014-01-1050.
4. M. Carello, A. Ferraris, A. Airale, A. Serra, "Design the City Vehicle XAM using CFD analysis", SAE International Conference, Detroit, 21-23 April 2015, doi n. 10.4271/2015-01-1533.
5. M. Carello, A. Airale, A. Messana, "IDRApegasus: a carbon fiber monocoque vehicle prototype", Material Science and Engineering Technology, Wiley-VCH, vol. 45, n. 5, May 2014, pp. 307-405, ISSN 0933-5137.
6. M. Carello, A. Airale, A. Ferraris, A. Messana, "XAM 2.0: from student competition to professional challenge", Computer-Aided Design and Applications, Taylor & Francis, 11 (S1), S61-67, doi n. 10.1080/16864360.2014.914412
7. M. Carello, A. De Vita, A. Ferraris, "Method for increasing the humidity in polymer electrolyte Membrane Fuel cell", Fuel Cells, Wiley Online, 1-8, 2016, doi 10.1002/fuce.201500110



Marco Carricato
Università di Bologna

Cable Driven Parallel Robots

Cable-driven Parallel Robots (CDPRs) are a class of robots where the end-effector is moved by extensible cables that can be coiled and uncoiled on motorized winches, thus working like multi-DOF cranes. CDPRs provide advantages such as: very large workspaces, high payload-to-robot-weight ratio, high dynamic performances, ease of assembly and disassembly, superior reconfigurability. However, cables can only provide tensile forces. Accordingly, in order to maintain all cables are under tension, overconstrained CDPRs have more cables than the required number of DOFs, with cables pulling each other. This allows all DOFs to be controlled, but limits application in crowded environments. Alternatively, some CDPRs, denoted as underconstrained, use a reduced number of cables. This choice decreases the dexterity and workspace of the robot, couples kinematic and dynamic behaviors, but improves accessibility and usability. Our main results include: kinematic and dynamic analyses of underconstrained robots, stability and workspace analysis, control architectures based on guaranteed computational techniques (Interval Analysis), and the development of an 8-cable reconfigurable prototype.

Main recent publications:

1. Berti A., Merlet J.-P., Carricato M., 2016: Solving the direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots by interval analysis. *Int Journal of Robotics Research*, 35(6): 723-739.
2. Abbasnejad G., Carricato M., 2015: Direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with n cables. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(2): 468-478.
3. Carricato M., 2013: Direct geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with three cables. *ASME Journal of Mechanisms and Robotics*, 5(3), Paper No. 031008.
4. Carricato M., 2013: Inverse geometrico-static problem of underconstrained cable-driven parallel robots with three cables. *ASME Journal of Mechanisms and Robotics*, 5(3), Paper No. 031002.
5. Carricato M., Merlet J.-P., 2013: Stability analysis of underconstrained cable-driven parallel robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(1): 288-296.

Screw Theory

Screw theory is the algebra and calculus of 6D vectors arising in the kinematics and dynamics of rigid bodies. Screws describe in a compact way forces and moments, as well as angular and linear velocities. We conducted extensive research on both theoretical and practical aspects of screw theory in robotics and mechanisms. Our main theoretical contributions are the identification and classification of several special screw systems, including the persistent screw systems (PSS), and the Lie triple screw systems (LTS). A PSS corresponds to the twist space of a mechanism that remains invariant up to a rigid displacement under arbitrary finite motions away from singularities. The exhaustive classification of all serial chains with an m -dimensional PSS of the end-effector is complete up to $m \leq 4$. LTSs are the tangent spaces at the identity of symmetric subspaces of the rigid displacement group $SE(3)$, and may be considered a natural generalization of the correspondence between Lie subalgebras and connected Lie subgroups of $SE(3)$. PSSs and LTSs allow us to expand the theoretical framework under which the inference of finite motion properties from instantaneous ones is guaranteed. We applied our discoveries to several important applications related to mechanisms and robotics, including design and motion planning of homokinetic joints, parallel manipulators and robotic wrists.

Main recent publications:

1. Wu Y., Löwe H., Carricato M., Li Z., 2016: Inversion symmetry of the Euclidean group: theory and application in robot kinematics. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(2): 312-326.
2. Selig J. M., Carricato M., 2016: Persistent rigid-body motions and Study's "Ribaucour" problem. *Journal of Geometry*, 107(3).
3. Löwe H., Wu Y., Carricato M., 2016: Symmetric subspaces of $SE(3)$. To appear on *Advances in Geometry*.
4. Carricato M., Zlatanov D., 2014: Persistent Screw Systems. *Mechanism and Machine Theory*, 73: 296-313.

Industrial Research

We are involved in several application-oriented projects in collaboration with industrial partners. The main topics are:

- energy efficiency of servo-actuated automatic machinery;
- mechanism optimization of automatic machinery;
- robotic solutions for flexible and modular automatic machinery;
- robotized production cells;
- compliant joints for automatic machinery;
- compact gear reducer for robotic applications;
- servo-actuated axes for automotive, marine and sub-marine applications;
- servo-actuated axes for sheet-metal forming presses.

Steven Chatterton
Politecnico di Milano - Dipartimento di Meccanica
Diagnostica di cuscinetti in ambito ferroviario

L'attività di ricerca ha come obiettivo la diagnostica e la prognostica dei cuscinetti ad elementi volventi installati nei sistemi di trazione di treni passeggeri per servizio regionale ed ad alta velocità, per un passaggio dall'attuale strategia di manutenzione programmata ad un approccio di tipo condition-based. Il problema è particolarmente sentito per i treni ad alta velocità dove le gravose condizioni di esercizio e l'elevata percorrenza giornaliera possono richiedere frequenti manutenzioni. Risulta pertanto strategico lo sfruttamento ottimale della vita residua dei componenti per una migliore programmazione dell'attività manutentiva, evitando al contempo fermate del convoglio lungo la tratta per rotture improvvise dei componenti stessi.

Nella prima fase dell'attività di ricerca è stato realizzato un banco prova in scala 1:1 per il sistema di trazione di un treno ad alta velocità [1]. Il banco prova è in grado di riprodurre, mediante piattaforme vibranti, le sollecitazioni dinamiche di marcia del treno. In questa fase è stato possibile testare il comportamento dinamico del sistema in presenza di danneggiamenti noti sui cuscinetti per diverse condizioni di funzionamento e identificare, mediante prove di durata, la progressione dei difetti stessi. La posizione ottimale dei sensori, l'influenza delle condizioni operative, nonché la definizione di nuove tecniche di analisi dei segnali [2-4] sono i principali risultati ottenuti in questa fase dell'attività di ricerca.

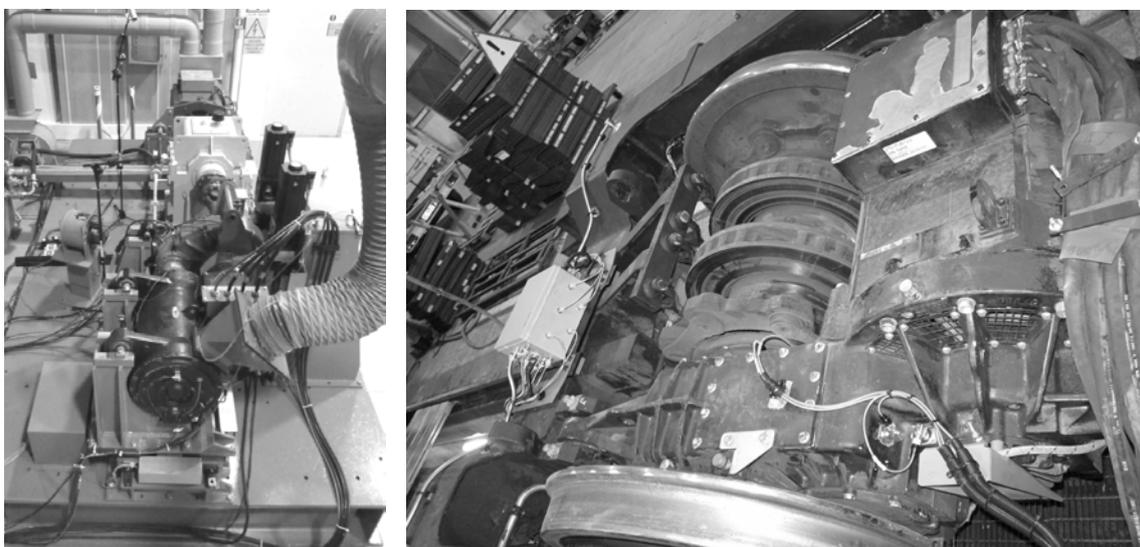


Fig. 1 – Banco prova in scala 1:1 per il sistema di trazione di un treno ad alta velocità (sinistra); installazione sensori sul sistema di trazione della locomotiva E464 (destra).

L'analisi e i risultati ottenuti dal banco prova sono confluiti nell'attività di ricerca, attualmente in corso, che prevede il monitoraggio dei cuscinetti di una locomotiva E464 per servizio passeggeri regionale [5]. I segnali acquisiti dagli accelerometri e dai sensori di temperatura installati sulle quattro unità motrici della locomotiva, sono inviati tramite connessione Wi-Fi al sistema di elaborazione dati installato a bordo treno. Tale sistema, operante in real-time, è in grado di segnalare la presenza di un difetto e di quantificarne il livello di danneggiamento. Il sistema ha permesso di identificare la presenza di difetti costruttivi della gabbia dei cuscinetti dell'albero di uscita e di danneggiamenti per contaminazione dei cuscinetti dei motori.

Lavori più rappresentativi:

1. P. Pennacchi, S. Bruni, S. Chatterton, R. Ricci, P. Borghesani, F. Gherardi, D. Marinis, A. Didonato, F. Unger-Weber (2010), "Design of a Test-rig for Traction Equipment of Very High Speed Trains", The 8th IFToMM International Conference on Rotor Dynamics. September 12-15, 2010, Seoul, Korea, pp. 882- 889.
2. P. Borghesani, P. Pennacchi, R. Ricci, S. Chatterton (2013), "Testing second order cyclostationarity in the squared envelope spectrum of non-white vibration signals", Mechanical Systems And Signal Processing, 40, pp. 38- 55.
3. P. Borghesani, R. Ricci, S. Chatterton, P. Pennacchi (2013), "A new procedure for using envelope analysis for rolling element bearing diagnostics in variable operating conditions", Mechanical Systems And Signal Processing, 38, pp. 23- 35.
4. P. Borghesani, P. Pennacchi, S. Chatterton (2014), "The relationship between kurtosis- and envelope-based indexes for the diagnostic of rolling element bearings", Mechanical Systems And Signal Processing, 43, pp. 25- 43.
5. Chatterton, S., Pennacchi, P., Vania, A., Borghesani, P. (2015), "Architecture of the monitoring system for the traction system bearings of a regional locomotive". Mechanisms and Machine Science, 21, pp. 455-464.

Simone Cinquemani
Politecnico di Milano

Controllo attivo delle vibrazioni di sistemi meccanici

Il controllo attivo di vibrazioni è un ambito di ricerca multidisciplinare ed affronta problematiche associate alla dinamica dei sistemi meccanici, al progetto e all'impiego di attuatori, all'utilizzo di sensori innovativi e alla sintesi di algoritmi di controllo robusti ed efficaci.

In tutti questi ambiti il gruppo di ricerca ha sviluppato competenze e know-how, sia come ricerca di base, ma anche e soprattutto, come applicazioni a casi industrialmente rilevanti nei settori del trasporto aereo, marittimo e ferroviario, dell'industria manifatturiera, dell'ingegneria civile, fino al settore degli elettrodomestici.

Il punto di forza risiede nella capacità di modellare il comportamento dinamico degli elementi coinvolti nel processo di controllo e di avere un chiaro senso fisico delle grandezze coinvolte. Questo ha permesso di sviluppare numerosi attuatori innovativi basati su materiali magnetostrittivi, piezoelettrici e a polimeri elettro-attivi e di impiegarli efficacemente in applicazioni di controllo attivo. Allo stesso modo, la conoscenza della dinamica dei sistemi ha consentito lo sviluppo di algoritmi di controllo efficienti, basati su modelli matematici robusti, ottimizzati per ridurre il livello di vibrazioni anche a fronte di eventuali guasti di sensori e/o di attuatori.

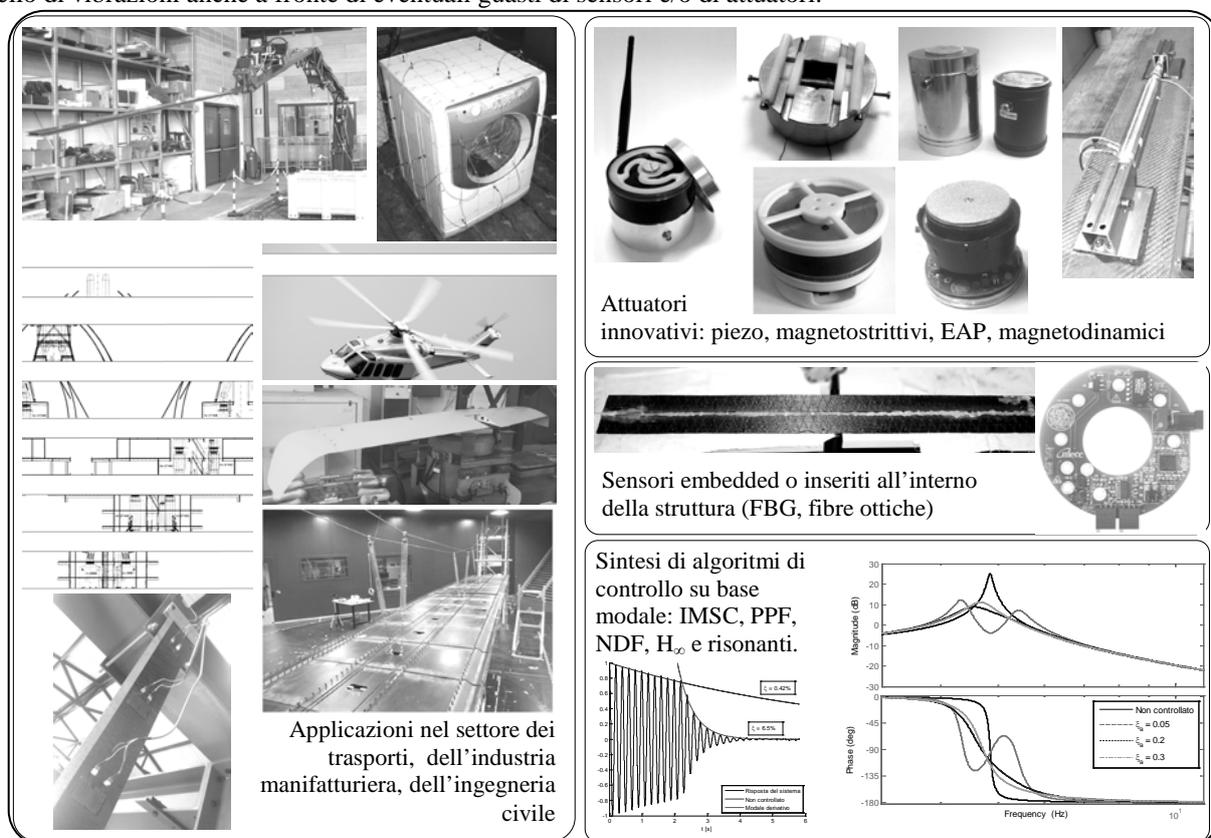


Fig. 1 – Principali ambiti della ricerca legati al controllo attivo di vibrazioni

In questi ambiti sono numerosi i progetti di ricerca finanziati ottenuti negli ultimi anni tra cui “ST.I.M.A - Strutture ibride per la Meccanica e l’Aerospazio” volto a dimostrare la fattibilità di strutture smart, in materiale composito e metallico, capaci di controllare in modo autonomo eventuali vibrazioni indesiderate e “Industria 2015 – Nuova generazione di sistemi navali” volta a migliorare il comfort a bordo delle navi da crociera abbattendo in modo attivo le vibrazioni provenienti dal fumaio. A livello industriale, il gruppo di ricerca ha attive numerose collaborazioni tra cui quelle con Agusta-Westland, Fincantieri, Whirlpool, CIFA, Finmeccanica e Siemens.

1. S Cinquemani, G Cazzulani, L Comolli and F Resta, “A quasi-modal approach to overcome FBG limitations in vibration control of smart structures”, 2013, Smart Materials and Structures, 22(12).
2. S. Cinquemani, G. Cazzulani, L. Comolli, A. Gardella, F. Resta “Vibration control of smart structures using an array of Fiber Bragg Grating sensors”, 2014, Mechatronics, 24(4), 345-353
3. S.Cinquemani, F.Resta “A Mechanical Approach to the design of IMSC for Vibration Suppression”, 2013, Transaction of the ASME – Journal of Vibration and Acoustics, 135(5),
4. F. Braghin, S. Cinquemani, F. Resta “A Low Frequency Magnetostrictive Inertial Actuator for Vibration Control”, 2012, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 180, Pages 67–74

Marco Cocconcelli

Università di Modena e Reggio Emilia – Sede di Reggio Emilia
Diagnostica di cuscinetti volventi in regime non-stazionario

L'attività di ricerca scientifica riguarda principalmente lo sviluppo di modelli e metodologie per il condition monitoring e la diagnostica di cuscinetti volventi in regime di funzionamento non-stazionario. I cuscinetti volventi, assieme agli ingranaggi, sono tra i componenti più utilizzati nell'ingegneria meccanica e come tali si ritrovano in molteplici applicazioni, tra cui ad esempio i motori elettrici di tipo direct drive. Questo tipo di motore è ampiamente utilizzato nelle macchine automatiche più recenti, dove ha sostituito i più classici motori asincroni caratterizzati da un regime di funzionamento stazionario. I motori direct drive sono completamente controllabili ed è possibile utilizzare profili di velocità complessi, ad esempio di tipo polinomiale con inversione della direzione di moto, creando camme elettriche che semplificano la catena cinematica sostituendo riduttori o camme meccaniche a valle del motore. La parte più rilevante della letteratura riguardante il condition monitoring dei cuscinetti è basata su applicazioni a velocità costante e i modelli matematici che ne stanno alla base definiscono le frequenze caratteristiche di danno sui cuscinetti come proporzionali alla frequenza di rotazione, definita come differenza di velocità di rotazione tra gli anelli interno ed esterno. Se il profilo di velocità del motore non è costante, la frequenza di rotazione varia rendendo impossibile definire le frequenze di danno attese è necessario, pertanto, definire nuovi algoritmi e metodologie per la diagnostica. Negli ultimi cinque anni si è assistito a un progressivo spostamento di tutta la comunità scientifica di settore su questo campo di ricerca. A oggi la totalità degli articoli di diagnostica riguarda applicazioni in condizioni di lavoro non-stazionario.

L'attività di ricerca – attiva dal 2007 grazie a una collaborazione continuativa con l'azienda Tetra Pak Packaging Solutions – ha portato alla realizzazione di un brevetto industriale internazionale per l'elaborazione dei dati e la diagnostica di cuscinetti volventi in motori funzionanti a velocità variabile. I risultati e le metodologie studiate hanno riguardato: un modello computazionale (in ambiente Simulink) del segnale di vibrazione atteso per un cuscinetto difettoso in moto con un profilo di velocità qualsiasi; una procedura per l'ottimizzazione del segnale ricampionato in base angolo in regime non-stazionario; l'applicazione di tecniche tempo-frequenza per la diagnostica di cuscinetti; l'impiego di sistemi esperti quali Support Vector Machines, reti neurali artificiali, sistemi immunitari artificiali per il riconoscimento di firme di guasto in regime non-stazionario; applicazione di tecniche di clustering e sviluppo di indicatori scalari per la classificazione dello stato di salute di cuscinetti; metodologie di diagnostica a partire da segnali elettrici, quali le correnti assorbite dal motore; Più recentemente si è sviluppato un modello avanzato di simulazione del segnale vibratorio atteso al variare di diversi parametri e condizioni di funzionamento in collaborazione con i colleghi dell'Università di Ferrara. Le metodologie descritte sono state estese e applicate alla diagnostica di altri componenti meccanici quali ruote dentate, utensili da taglio, ralle piane, in collaborazione con più di trenta aziende e all'interno di progetti di ricerca nazionali. L'attività ha permesso di avviare collaborazioni con diverse università straniere e l'avvio della conferenza biennale *International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations*.

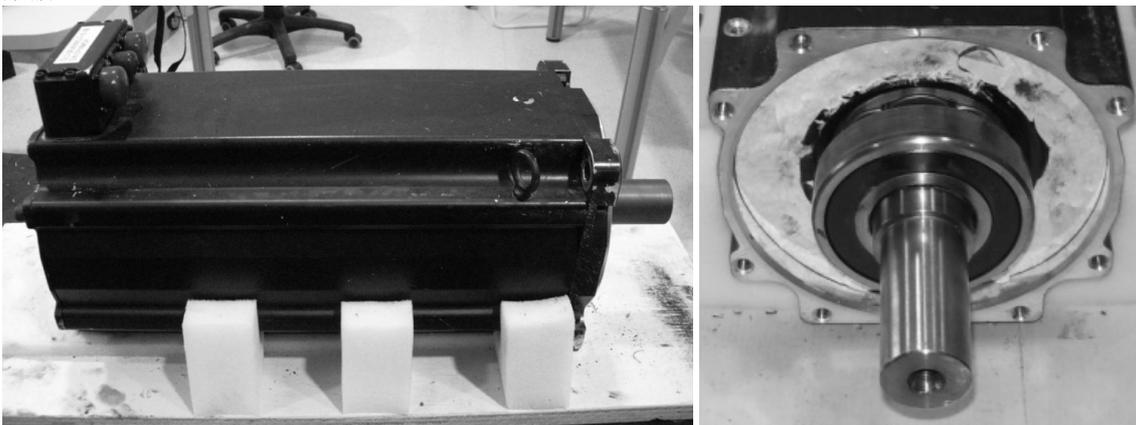


Fig. 1 –MPL-B680B motore brushless di Rockwell Automation. Particolare del cuscinetto NSK 6309

Lavori più rappresentativi:

1. M. Cocconcelli, L. Bassi, C. Secchi, C. Fantuzzi, R. Rubini, "An algorithm to diagnose ball bearing faults in servomotors running arbitrary motion profiles", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 27, 2012, pp. 667-682
2. L. Montechiesi, M. Cocconcelli, R. Rubini, "Artificial immune system via Euclidean Distance Minimization for anomaly detection in bearings", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volumes 76-77, 2016, pp. 380-393
3. F. Immovilli, C. Bianchini, M. Cocconcelli, A. Bellini, R. Rubini, "Bearing fault model for induction motor with externally induced vibration", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, 2013, pp. 3408-3418

Federico Colombo
Politecnico di Torino
Supporti ad aria

L'attività di ricerca sui supporti ad aria è volta da un lato allo sviluppo di modelli numerici idonei alla simulazione di tali supporti, dall'altro alla verifica sperimentale dei modelli mediante banchi prova.

Sono stati sviluppati modelli numerici a parametri distribuiti che calcolano la distribuzione di pressione che si crea al di sotto di:

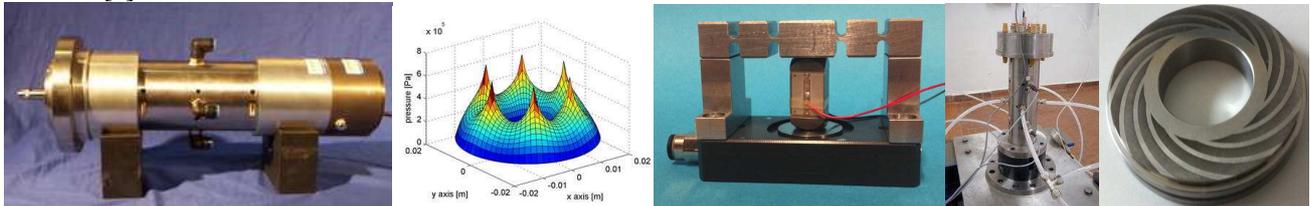
- pattini pneumostatici piani (di forma circolare o rettangolare)
- cuscinetti reggispira assiali (statici e/o dinamici)
- boccole radiali (statiche e/o dinamiche) [1]

Tali metodi consentono sia un'analisi statica, sia un'analisi dinamica per la stima dello smorzamento e la verifica della stabilità. Diverse tecniche di discretizzazione sono state utilizzate (differenze finite o volumi finiti) e anche diversi metodi di risoluzione sono stati confrontati (Eulero esplicito, Newton Raphson, implicit ADI method).

Sono inoltre stati sviluppati alcuni modelli a parametri concentrati di pattini pneumostatici che consentono più agevolmente un'analisi di sensitività rispetto ad alcuni parametri geometrici [2].

Sono stati sviluppati banchi prova e prototipi per:

1. testare mandrini ed elettro-mandrini ad alta velocità supportati da cuscinetti ad aria al fine di misurare le rigidità assiali e radiali, la capacità di carico e i consumi [3].
2. verificare la stabilità di rotori con cuscinetti ad aria ad alta velocità montati su supporti rigidi [4] oppure montati su O-ring [5].
3. testare reggispira assiali dinamici (spiral groove e taper land) [6]
4. caratterizzare i sistemi di alimentazione di tali cuscinetti, in particolare individuando i coefficienti di efflusso degli ugelli di alimentazione [7].
5. misurare le curve di capacità di carico e consumo in funzione del meato per pattini pneumostatici piani [8].
6. misurare lo smorzamento di pattini pneumostatici piani.
7. studiare le performance di pattini ad aria attivi (con valvole pneumatiche digitali o con attuatori piezoelettrici) [9].



Lavori più rappresentativi:

1. Colombo F., Raparelli T., Viktorov V., Externally pressurized gas bearings: a comparison between two supply holes configurations, (2009), Tribology International, Vol. 42, pp. 303-310.
2. Colombo F., Raparelli T., Trivella A., Viktorov V. (2015), Lumped parameters models of rectangular pneumatic pads: static analysis, Precision Engineering, Vol. 42, pp. 283-293.
3. Belforte G., Raparelli T., Viktorov V., Trivella A., Colombo F., An experimental study of high-speed rotor supported by air bearings: test rig and first experimental results, (2006), Tribology International, Vol. 39, pp. 839-845.
4. Viktorov V., Belforte G., Raparelli T., Colombo F., Design of non-circular gas bearings for a ultra-high speed spindle, (2009), World Tribology Congress 2009, Japanese Society of Tribologists, Kyoto, Japan, September 6-11, 2009, C1-212, p. 304
5. Belforte G., Colombo F., Raparelli T., Viktorov V., High speed rotor with air bearings mounted on flexible supports: test bench and experimental results, (2008), ASME Journal of Tribology, Vol. 130, (2), pp. 021103-1-7.
6. Villavicencio R., Colombo F., Raparelli T., Viktorov V., Development of dynamic gas thrust bearings: design and first experimental results, (2013), XXI Congress of the Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics (AIMETA), Sept. 17-20, 2013, Torino.
7. Belforte G., Colombo F., Raparelli T., Trivella A., Viktorov V. (2011). Identification of micro-hole discharge coefficients for air bearings. 561- 566, vol.2, 3rd European Conference on Tribology. 7-9 June 2011, Vienna.
8. Belforte G., Colombo F., Raparelli T., Trivella A., Viktorov V., (2013). Experimental Analysis of Air Pads with Micro-Holes. Tribology Transactions (ISSN:1040-2004). 169- 177. 56.
9. Colombo F., Lentini L., Raparelli T., Viktorov V., (2015), An active compensated aerostatic thrust bearing with flexure hinges and a piezo actuator. Ecotrib2015, Lugano, 3-5 June.

Gianluca D'Elia

Dipartimento di Ingegneria – Università degli Studi di Ferrara

Diagnostica vibrazionale delle macchine rotanti

L'attività di ricerca scientifica riguarda principalmente il monitoraggio e la diagnostica di macchine rotanti mediante misure vibro-acustiche ed analisi del segnale. La ricerca è prevalentemente rivolta a motori a combustione interna (c.i.) [1], ingranaggi e cuscinetti volventi [2], con riferimento sia a problematiche di manutenzione predittiva, sia di controllo di qualità a fine linea di produzione. In particolare si sono sviluppate e studiate differenti tecniche avanzate di analisi del segnale finalizzate alla diagnostica di sistemi meccanici, con particolare riferimento alle analisi tempo-frequenza ed all'analisi di ciclostazionarietà. Riguardo al dominio tempo-frequenza, si sono studiate la Continuous Wavelet Transform (CWT) e la Wigner-Ville Distribution (WVD), confrontando la sensibilità di tali tecniche nell'identificazione di alcuni difetti meccanici. In relazione alla WVD, si sono valutati diversi metodi di ricostruzione del segnale per l'eliminazione delle componenti fittizie, dovute alla non linearità della distribuzione. L'interesse della ricerca è particolarmente focalizzato, tra i diversi tipi di segnali non stazionari, sulla famiglia dei segnali Ciclostazionari, studiando diverse tecniche avanzate - quali Cyclic Spectrum, Cyclic Modulation Spectrum e Cyclic Spectral Density Function - e sviluppando opportune formulazioni matematiche che incrementino l'efficienza computazionale di queste tecniche. La ricerca è stata poi estesa all'analisi di segnali ciclostazionari in condizioni di velocità variabile (ciclo-non-stazionari), modificando opportunamente le principali tecniche di analisi dei segnali ciclostazionari - quali Cyclic Spectral Density Function e Cyclic Modulation Spectrum - a segnali ciclo-non-stazionari [3]; in tal modo è stato possibile affrontare casi industriali in cui la velocità di rotazione del sistema meccanico non è costante.

L'efficacia ed i limiti di queste tecniche per la diagnostica delle macchine rotanti è stata analizzata sia impiegando modelli matematici dei segnali vibratorii in presenza di difetti, sia applicandole a numerosi segnali vibratorii reali, in collaborazione con numerose aziende del settore, tra cui Bonfiglioli Riduttori, CNH Italia, Bondioli & Pavesi e VM Motori (FCA).

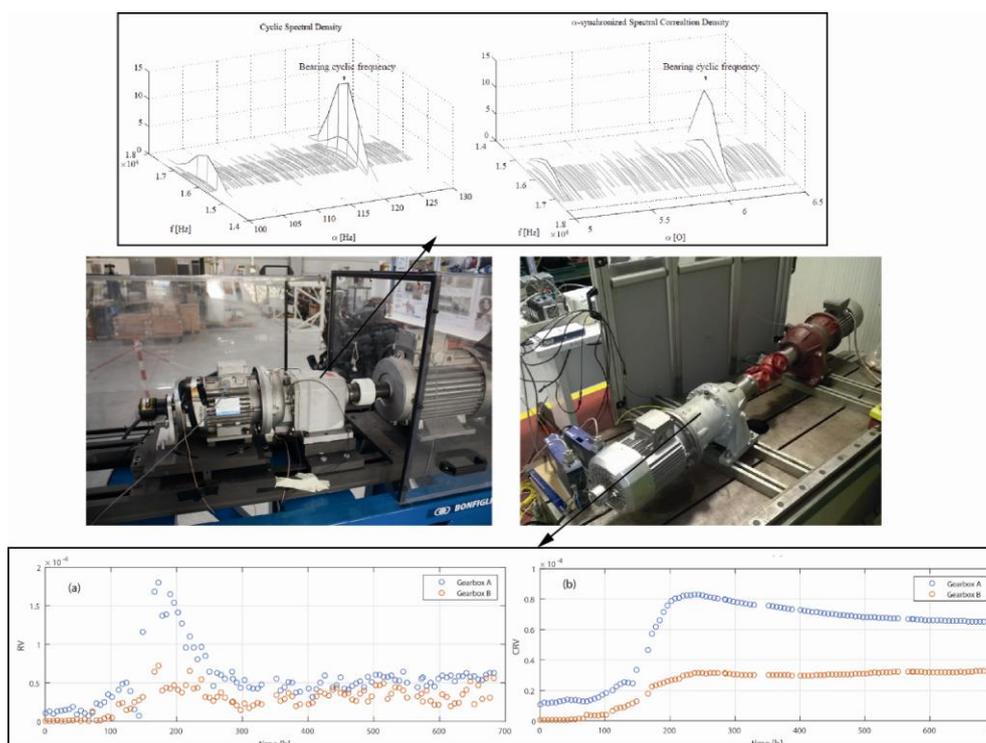


Fig. 1 - Diagnostica vibrazionale di riduttori ad ingranaggi

Lavori più rappresentativi:

1. S. Delvecchio, G. D'Elia, G. Dalpiaz (2015) "On the use of cyclostationary indicators in IC engine quality control by cold tests", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 60–61, (August 2015), pp. 208–228, DOI: 10.1016/j.ymssp.2014.09.015.
2. G. D'Elia, M. Cocconcelli, E. Mucchi, G. Dalpiaz (2016) "Combining blind separation and cyclostationary techniques for monitoring distributed wear in gearbox rolling bearings", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, DOI: 10.1177/0954406216636165
3. G. D'Elia, Z. Dahe, J. Antoni (2010) "A novel approach for the cyclo-non-stationary analysis of speed varying signals", Proceedings of ISMA2010, Leuven, Belgium, 2010, September 20-22.

Egidio Di Galleonardo
Politecnico di Milano – Dipartimento di Meccanica
Controllo attivo delle sospensioni secondarie di veicoli ferroviari

Il trasporto ferroviario si propone sempre più come una valida alternativa a quello aereo sulle medie distanze, grazie alle crescenti velocità di percorrenza, alla possibilità di accesso diretto nei centri urbani e alla sua futura adattabilità a una società basata su qualsiasi fonte energetica primaria. A livello tecnico l'aumento delle velocità introduce importanti problematiche come la stabilità del veicolo, le vibrazioni trasmesse all'infrastruttura (binari e catenaria) e il comfort dei passeggeri. Negli ultimi decenni ci si è mossi in diverse direzioni per affrontare le varie problematiche dei treni ad alta velocità, una di queste è l'introduzione di sistemi mecatronici che consentano di controllare e migliorare il comportamento dinamico del veicolo. In questo senso l'utilizzo di sospensioni secondarie attive rappresenta un campo di studio tuttora in fase di sviluppo, in cui non si è ancora affermata una soluzione definitiva. Essendo comprovata l'efficacia di sistemi di pendolamento nel miglioramento del comfort e la riduzione dei tempi di percorrenza, l'impiego dello stesso principio sui veicoli ad alta velocità pare una strada percorribile. Il pendolamento risulterebbe infatti utile a realizzare un aumento delle velocità di percorrenza, mantenendo il medesimo livello di comfort e senza la necessità di interventi sulla linea. Nell'ambito dell'attività di ricerca sono state studiate due differenti soluzioni, la prima testata anche su un banco prova full-scale, come mostrato in Figura 1a, la seconda, invece, è stata studiata solo da un punto di vista numerico. La prima soluzione proposta prevede l'utilizzo di sospensioni secondarie pneumatiche attive, rendendo quindi controllabili le già presenti molle ad aria. Il sistema così ottenuto consente il controllo del moto di rollio e di quello laterale, rendendo possibile un pendolamento che riduca l'accelerazione non compensata in curva. L'impiego di sospensioni pneumatiche attive da un lato risulta di facile implementazione, essendo sufficiente aggiungere una servovalvola sul circuito pneumatico, dall'altro però risulta dispendioso a livello energetico, a causa dell'elevato consumo di aria, e poco efficiente, dovendo l'attuazione opporsi all'effetto della barra anti-rollio. La seconda soluzione proposta parte da questa considerazione e prevede l'impiego di una barra anti-rollio idraulica attiva (basata su uno schema detto a sospensioni interconnesse) combinata con una sospensione laterale attiva, sempre idraulica. In questo caso, tramite l'impiego di un circuito idraulico e due attuatori verticali si realizza un sistema, mostrato in Figura 1b che, se passivo, è assimilabile a una barra anti-rollio e, se attivo, può invece realizzare il pendolamento. La soluzione così ottenuta si è dimostrata efficace nell'innalzamento della velocità di percorrenza in curva del veicolo. Ottimizzando le diverse strategie di controllori proposte (mediante una procedura basata sugli algoritmi genetici) è possibile non solo garantire le performance in termini di inseguimento del riferimento di traiettoria imposto ma anche di mantenere lo stesso comfort vibrazionale nonostante l'aumento di velocità di percorrenza.

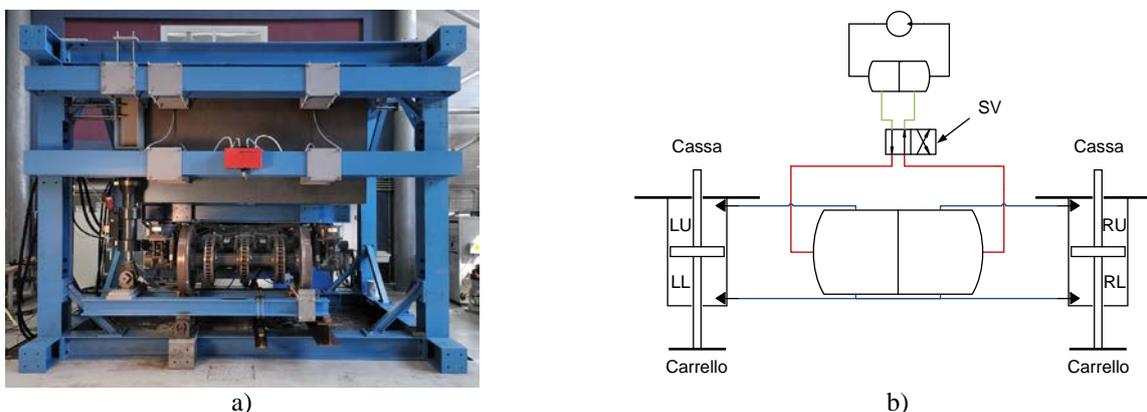


Fig. 1: a) banco full-scale per la prova delle sospensioni secondarie pneumatiche attive; b) schema della barra antirollio attiva.

Lavori più rappresentativi:

1. Facchinetti A., Di Galleonardo E., Resta F., Bruni S., Brundisch V., "Active control of secondary airspring suspension", Proceedings of 22nd International Symposium on Dynamics of Vehicle on Roads and Tracks (IAVSD 2011), Manchester
2. Colombo, E.F., Di Galleonardo, E., Facchinetti, A., Bruni, S., "Study of an active hydraulic anti-roll device for high-speed railway vehicles", Proceedings of 23rd International Symposium on Dynamics of Vehicle on Roads and Tracks (IAVSD 2013), Qingdao
3. Colombo, E. F., Di Galleonardo, E., Facchinetti, A., Bruni, S., "Active carbody roll control in railway vehicles using hydraulic actuation", Control Engineering Practice 31, pp. 24–34, 2014.

Giandomenico Di Massa
Università degli Studi di Napoli "Federico II"
Sulla dinamica dell'avantreno del motociclo

Nell'ambito della dinamica del motociclo, è stata svolta un'ampia attività di ricerca sia teorica-numerica che sperimentale sulla dinamica dell'avantreno, nel particolare riguardo la possibilità che in certe condizioni si possano innescare fenomeni di vibrazioni autoeccitate.

E' stato messo appunto un modello di riferimento, essenzialmente costituito da una ruota girevole (castor), il cui comportamento dinamico è influenzato dalle caratteristiche geometriche-strutturali, inerziali e dall'interazione pneumatico-strada.

La risposta dinamica dell'avantreno dipende infatti essenzialmente:

- dalla rigidità flessionale e torsionale della forcella che, a sua volta dipende dalla geometria della sospensione;
- dalla rigidità laterale dell'assieme ruota-pneumatico;
- dall'interazione pneumatico-suolo.

L'attività sperimentale è stata svolta in laboratorio utilizzando il banco prova motocicli realizzato in Dipartimento (fig. 1), che, in maniera estremamente sintetica si può dire costituito da una flat-track, al disopra della quale è stato posizionato l'avantreno di uno scooter vincolato alla struttura in maniera tale da poter traslare verticalmente e contemporaneamente ruotare intorno all'asse di sterzo (fig.2).

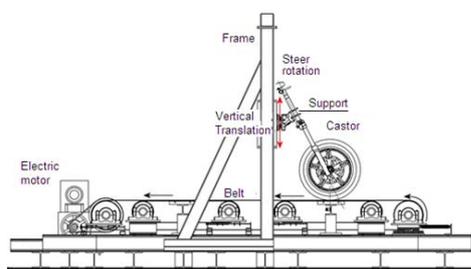


Fig.1 Schema impianto sperimentale



Fig.2 Castor sul banco



Fig. 3 Foderi strumentati

La sospensione è stata modificata, impedendo lo scorrimento tra stelo e fodero, in maniera tale da rendere indipendente dal carico verticale la lunghezza degli steli e quindi la rigidità flessionale degli stessi.

Una prima serie di attività sperimentali hanno riguardato indagini sia sulla frequenza che sullo smorzamento dello shimmy al variare di diversi parametri quali ad esempio: la velocità di avanzamento, il carico verticale, l'angolo di inclinazione dell'asse di sterzo, la pressione di gonfiaggio dello pneumatico, le caratteristiche d'inerzia dell'avantreno ecc.. Tali indagini hanno permesso di caratterizzare il fenomeno dello shimmy e di capire in che maniera l'instabilità dello stesso fosse influenzata dai vari parametri.

Una successiva tipologia di indagini ha riguardato la misura della forza di interazione laterale pneumatico-strada sia in condizioni di stabilità che d'instabilità. La misura è stata eseguita applicando una serie di estensimetri ai foderi della sospensione, in configurazione tale da rilevare il solo sforzo di taglio (fig. 3).

L'attuale attività sperimentale è indirizzata ad effettuare un'indagine sui alcuni modi di vibrare dell'avantreno in diverse condizioni di funzionamento.

Le prove sono effettuate a sterzo bloccato applicando una forza armonica laterale in corrispondenza dell'asse della ruota tramite uno shaker elettrodinamico e contemporaneamente misurando il taglio nei foderi della sospensione.

Le prove sono state ripetute in tre condizioni: ruota sollevata, ruota poggiata con nastro fermo e con nastro in movimento, evidenziando le variazioni in termini di frequenza e smorzamento del modo di vibrare e di trasmissibilità della forza al variare della velocità di avanzamento.

Lavori più rappresentativi:

1. D. De Falco, G. Di Massa, S. Pagano, "On castor dynamic behavior", Journal of the Franklin Institute n.347, 2010, pp. 116-129;
2. G. Di Massa, S. Pagano, S. Strano, M. Terzo - A stability analysis of the wheel shimmy – in Proc. of the ASME 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, (ESDA), Vol. 1, pp. 669 – 678, Nantes, France, July 2-4, 2012.
3. D. de Falco, S. della Valle, G. Di Massa, S. Pagano, The influence of the tyre profile on motorcycle behaviour, Supplement of Vehicle Systems Dynamics; vol.43, 2005, pp. 179-183.
4. D. de Falco, G. Di Massa, S. Pagano - Wheel shimmy experimental investigation – ASME 2012, 11th Biennial Conference on Engineering systems Design and Analysis (ESDA) Vol.1, pp. 717-726 –, July 2-4, 2012
5. G. Di Massa, S. Pagano, S. Strano, M. Terzo - A mono-axial wheel force transducer for the study of the shimmy phenomenon - World Congress on Engineering (WCE), (ISBN: 978-988-19251-0-7) - London, U.K., 3-5 July, 2013.