



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede: Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

CORSO DI DOTTORATO IN: Ingegneria Meccatronica e dell'Innovazione Meccanica del Prodotto

CURRICULUM: Meccatronica

CICLO XXXV

MODEL-BASED METHODS FOR PRECISE TRAJECTORY TRACKING IN UNDERACTUATED MULTIBODY SYSTEMS

Coordinatrice: Ch.mo Prof. Daria Battini

Supervisore: Ch.mo Prof. Dario Richiedei

Dottorando: Jason Bettega

SOMMARIO

Descrizione generale e motivazioni di base dell'elaborato

Il risparmio energetico rappresenta una tematica sempre più importante sia in ambiente industriale sia in quello accademico. Normalmente, i costruttori di robot puntano a raggiungere questo obiettivo diminuendo la massa dei componenti, tuttavia questo aspetto porta inevitabilmente alla comparsa di problematiche flessionali e pertanto i fenomeni vibrazionali divengono molto più rilevanti. La conseguenza principale in relazione alla presenza di vibrazioni meccaniche è rappresentata dal degrado dell'accuratezza nello svolgimento delle movimentazioni riguardanti il processo produttivo, portando di conseguenza a prodotti finali di più bassa qualità o, nel caso peggiore, a rotture pericolose durante le movimentazioni stesse. Queste problematiche rappresentano un'enorme perdita per le industrie in termini monetari in quanto la qualità, e anche la quantità, dei prodotti finali non sarebbero più pari a quelle attese; pertanto, deve essere svolta un'opportuna progettazione del sistema di controllo con l'obiettivo di prendere in considerazione la presenza di flessibilità e, in termini più generali, della proprietà di sotto-attuazione caratterizzante questi sistemi. Nel caso in cui questo aspetto non venisse considerato, si arriverebbe ad avere un sistema mecatronico completamente inefficiente in quanto i termini flessionali verrebbero sempre trattati come disturbi esterni dal punto di vista del controllore, il quale dovrebbe mitigarne l'effetto senza l'ausilio della conoscenza di questi fenomeni e, pertanto, si otterrebbe un sistema in catena chiusa meno robusto e più energivoro. Come si può notare, quest'ultimo aspetto risulta essere completamente in contrasto con l'obiettivo iniziale di riduzione del consumo energetico, pertanto occorre progettare algoritmi di controllo più sofisticati che siano in grado di inglobare la proprietà di sotto-attuazione e, al contempo, assicurare ottime prestazioni durante l'esecuzione dei movimenti richiesti con basso consumo energetico. Per raggiungere tale obiettivo è necessario avere a disposizione un modello fisico-matematico che sia in grado di descrivere fedelmente la dinamica del sistema in esame e, di conseguenza, sfruttare tale conoscenza per la progettazione del sistema di controllo; a tal proposito, la teoria riguardante i sistemi multi-corpo è presa in considerazione.

Un aspetto fondamentale riguardante la dinamica dei sistemi multi-corpo riguarda la modellazione di sistemi meccanici, e mecatronici in generale, che sono soggetti ad ampi spostamenti non lineari. Questa tipologia di sistemi può essere suddivisa in due categorie principali: sistemi multi-corpo pienamente attuati e sistemi multi-corpo sotto-attuati. Il primo gruppo è caratterizzato da un numero di attuatori (linearmente indipendenti) pari al numero di gradi di libertà, mentre il secondo gruppo include tutti quei sistemi che presentano un numero di attuatori (linearmente indipendenti) inferiore rispetto al numero di coordinate indipendenti generalizzate. I sistemi multi-corpo sotto-attuati rappresentano pertanto una sfida interessante dal punto di vista della progettazione del controllore e, appunto per questo motivo, stanno assumendo sempre più rilevanza nell'ambito industriale.

La sotto-attuazione può presentarsi sostanzialmente in tre modi diversi. In primo luogo, una metodologia volta a minimizzare il peso o i costi può portare ad una riduzione del numero di attuatori ed in questo modo il sistema sotto-attuato risulta essere intenzionalmente voluto. In secondo luogo, uno o più attuatori possono giungere a rottura durante i vari processi lavorativi ed, in questo modo, la proprietà di sotto-attuazione compare in maniera accidentale; in entrambi i casi presentati, comunque, uno o più giunti attuati risultano essere sostituiti con dei giunti puramente passivi. Infine, la sotto-attuazione può comparire in presenza di flessibilità, ossia in maniera strutturale. Come menzionato precedentemente, quest'ultimo aspetto sta diventando sempre più comune oggi giorno a causa della progettazione di robot sempre più indirizzata alla diminuzione della massa dei componenti per far fronte alle specifiche riguardanti la limitazione del consumo energetico; infatti, i volumi produttivi stanno crescendo a ritmi sempre più veloci e, di conseguenza, gli ambienti industriali sono sempre più interessati ad ottenere dei sistemi robotici leggeri, dato che in tal modo si incrementerebbe il rapporto tra il peso massimo movimentabile dall'organo terminale dei robot ed il loro peso stesso.

Quest'ultimo aspetto risulta essere particolarmente interessante in quanto esso permette di ridurre il consumo energetico durante l'esecuzione dei movimenti. Anche se si ottenesse una riduzione relativamente piccola per una singola operazione, le varie movimentazioni sono solitamente svolte in modo ripetitivo all'interno dell'ambiente industriale, con alte frequenze di lavoro, e pertanto tale piccolo vantaggio in realtà porterebbe ad una diminuzione significativa della richiesta energetica complessiva. Tuttavia, come accennato precedentemente, la presenza di movimenti caratterizzati da dinamiche elevate rende la proprietà flessionale non più trascurabile in quanto possono sorgere vibrazioni meccaniche importanti; pertanto, il suo contributo deve essere propriamente modellato ed incluso all'interno della progettazione del controllore.

Dal punto di vista del sistema di controllo, i sistemi multi-corpo sotto-attuati rappresentano una tematica particolarmente difficile che sta mostrando sempre più interesse nell'ambito della ricerca. Più precisamente, sono state proposte diverse soluzioni nell'ambito del controllo a catena chiusa, spaziando dai più comuni controllori PID fino ad algoritmi di controllo più sofisticati, come ad esempio gli Sliding Mode Controllers. Similmente, considerando l'ambito della progettazione di controllori in catena aperta, diverse soluzioni sono state proposte negli ultimi anni, presentando algoritmi per il calcolo dell'inversione dinamica dei modelli fisico-matematici e portando in alcuni casi a soluzioni causali, mentre in altri casi a soluzioni puramente non-causali. In questo ambito, esempi tipici sono quelli che spaziano dagli algoritmi che sfruttano gli zeri delle funzioni di trasferimento linearizzate, come la tecnica NPZ-Ignore, ai più recenti metodi basati sulla proprietà di planarità dei sistemi, come l'algoritmo Byrnes-Isidori.

Scopo e riassunto della tesi

Lo scopo di questa tesi è quello di offrire un insieme di strumenti utili per la progettazione del sistema di controllo in sistemi multi-corpo sotto-attuati, ampliando l'attuale stato dell'arte con formulazioni ed approcci innovativi, sia in termini di controllo in catena chiusa sia in termini di controllo in catena aperta.

Più precisamente, il capitolo 2 propone uno schema di controllo per l'inseguimento di traiettorie tempo-varianti, riferite all'organo terminale, in sistemi multi-corpo sotto-attuati a fase non minima, presentando una formulazione innovativa del controllore predittivo MPC (Model Predictive Control). La soluzione di questo problema non risulta essere banale a causa delle proprietà intrinseche di questa tipologia di sistemi multi-corpo e a causa delle caratteristiche riguardanti gli algoritmi di controllo MPC tradizionali. Infatti, questi ultimi sono generalmente sfruttati per problemi di regolazione o per problemi di inseguimento di segnali costanti, pertanto, per superare tali limitazioni, l'approccio proposto include all'interno del processo di ottimizzazione vincolato, caratteristico dell'MPC, un modello in spazio di stato autonomo per la descrizione del riferimento tempo-variante da inseguire. Il controllore proposto è pertanto denominato "MPC with Embedded Reference Dynamics" (MPC-ERD). Includendo direttamente il riferimento all'interno della progettazione del sistema di controllo, non è richiesta nessuna inversione dinamica, superando di fatto le difficoltà riguardanti l'inversione dinamica di modelli dinamici riguardanti sistemi sotto-attuati a fase non minima.

L'efficacia dell'algoritmo MPC-ERD è stata validata sperimentalmente attraverso un manipolatore planare sotto-attuato a due membri e i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli derivanti dall'utilizzo dell'algoritmo MPC tradizionale, in cui è stato incluso solamente un effetto integratore (aspetto incluso anche nell'algoritmo MPC-ERD proposto). Oltre ad ereditare i benefici riguardanti gli algoritmi di controllo MPC tradizionali, MPC-ERD è in grado di assicurare un inseguimento preciso della traiettoria di riferimento tempo-variante data all'organo terminale, con errori e ritardi di inseguimento trascurabili.

Lo stesso sistema sotto-attuato del capitolo 2 è considerato anche nel capitolo 3 come caso studio per un paradigma di controllo differente, denominato "Pole Placement". Questa tecnica di controllo è comunemente usata per l'imposizione esplicita delle frequenze naturali e dello smorzamento dei modi di vibrare di sistemi lineari, specialmente in presenza di dinamica flessionale non attuata: infatti,

l'imposizione di tali proprietà può essere facilmente ricondotto alle prestazioni ottenibili, come ad esempio il tempo di salita ed il tempo di assestamento. In particolare, questo capitolo propone un metodo per il controllo attivo di un braccio robotico flessibile a due membri in presenza di ritardo temporale, attraverso una tecnica robusta di Pole Placement. Tale problema risulta essere di interesse sia pratico sia teorico in quanto la presenza di ritardo temporale nel controllo delle vibrazioni può causare instabilità se non viene propriamente considerato all'interno della progettazione del sistema di controllo. Quest'ultima, infatti, è svolta attraverso il metodo alle ricettanze in modo da assegnare esattamente una coppia di poli e, al contempo, ottenere un appropriato margine di stabilità così da assicurare una robustezza adeguata in presenza di incertezze di modello. Il margine di stabilità desiderato viene ottenuto grazie alla risoluzione di un problema di ottimizzazione basato sul criterio di stabilità di Nyquist. Il metodo proposto è stato quindi applicato su un sistema meccatronico presente in laboratorio, che emula un tipico sistema robotico flessibile utilizzato per operazioni ripetitive di presa e rilascio, denominate "pick-and-palce". L'assunzione di linearizzazione attorno ad una configurazione di equilibrio porta all'identificazione delle relative ricettanze, valide per spostamenti infinitesimali attorno a tale configurazione, e di conseguenza all'applicazione della tecnica di controllo proposta. I termini non lineari, dovuti agli spostamenti finiti attorno alla configurazione di linearizzazione, alle incertezze dei parametri di modello, ai disturbi agenti sul sistema e alla bassa risoluzione degli encoder, sono gestiti in maniera efficace grazie all'inclusione della specifica di robustezza all'interno della progettazione del controllore. I risultati sperimentali, e la consistenza con i relativi risultati numerici attesi, dimostrano l'efficacia del metodo e la facilità di implementazione dello stesso. Il lavoro di tale capitolo è stato svolto in collaborazione con due università estere.

Il capitolo 4 propone uno schema di controllo innovativo per l'inseguimento preciso di traiettorie spaziali in robot a cavi paralleli cinematicamente determinati, non ridondanti, sotto-attuati. Per gestire le non linearità di modello, assicurando al contempo un onere computazionale contenuto, è proposto un controllore costituito da due azioni di controllo sequenziali. La prima azione riguarda un controllore MPC co-locato, dipendente dalla posizione, in cui è incluso un effetto integratore, e tale controllore viene utilizzato per la valutazione delle tensioni ottime dei cavi in modo da eseguire la traiettoria spaziale desiderata e assicurare, al contempo, l'adempimento dei vincoli di fattibilità. La seconda azione di controllo trasforma le tensioni ottime, calcolate al passo precedente, in coppie motrici di comando, e di conseguenza in correnti di comando, che vengono valutate attraverso il modello cinetostatico dei motori elettrici usati per avvolgere/svolgere i cavi. La progettazione del sistema di controllo avviene sfruttando il modello dinamico del robot, formulato con l'assunzione di base di cavi infinitamente rigidi. Mentre l'imposizione della positività delle tensioni è inclusa direttamente nell'algoritmo di controllo e trattata come vincolo "hard", la riduzione delle oscillazioni al carico è garantita tramite la penalizzazione, all'interno del funzionale di costo, di variazioni ampie delle tensioni, insieme all'imposizione di ulteriori vincoli "hard" sulla derivata delle tensioni stesse. Queste caratteristiche, insieme all'inclusione dell'integratore all'interno della formulazione MPC, assicurano delle tensioni di controllo che variano in maniera non brusca, riuscendo a gestire in tal modo la flessibilità dei cavi sebbene questa non sia considerata esplicitamente all'interno della progettazione del controllore.

Per verificare le prestazioni dell'algoritmo di controllo proposto, è stato simulato un robot a cavi paralleli cinematicamente determinato ed in configurazione sospesa, considerando la presenza di cavi caratterizzati da elevata flessibilità assiale. In aggiunta, è stato incluso un modello dinamico semplificato della dinamica riguardante l'anello di controllo di corrente, insieme all'effetto di quantizzazione dei segnali misurati, con l'obiettivo di fornire una rappresentazione realistica del sistema meccatronico considerato. I risultati, confrontati anche con un test di riferimento relativo allo stato dell'arte attuale, confermano sia l'efficacia e la robustezza dell'approccio proposto sia la sua fattibilità per sistemi real-time, grazie alla presenza di un onere computazionale notevolmente contenuto.

I risultati del capitolo 4 evidenziano chiaramente che i controllori predittivi MPC rappresentano una soluzione molto interessante per ottenere prestazioni elevate in sistemi robotici a cavi paralleli, anche in presenza di elevata flessibilità assiale dei cavi. Pertanto, visto che le perturbazioni legate alla presenza di flessibilità assiale dei cavi risultano trascurabili in termini di prestazioni nell'inseguimento di traiettorie spaziali, nel capitolo 5 è preso in considerazione un robot a cavi paralleli in configurazione sospesa con la presenza di cavi infinitamente rigidi. In particolare, risulta utile sottolineare il fatto che quando si ha un numero di cavi indipendenti pari al numero di gradi di libertà dell'organo terminale, di conseguenza, si è in presenza di un sistema pienamente attuato, fintantoché le tensioni dei cavi risultano maggiori di zero (o, nel caso limite, nulle). Quando però questa condizione non è verificata, i cavi caratterizzati da tensioni negative si allentano (in quanto i cavi possono solamente tirare e non spingere) e pertanto il sistema diviene sotto-attuato, con la comparsa delle problematiche ad esso associate. Per questa ragione, in questo capitolo viene considerato un robot a cavi paralleli in configurazione sospesa, con un numero di cavi indipendenti pari al numero di gradi di libertà, e in particolare è proposto uno schema di controllo MPC innovativo con l'obiettivo di assicurare inseguimento preciso di traiettorie tempo-varianti sia a livello spaziale sia a livello temporale per la classe di sistemi rappresentata dai robot a cavi paralleli. Questo problema non risulta banale in quanto, normalmente, questa tipologia di sistemi robotici è altamente non lineare e la positività delle tensioni dei cavi deve essere assicurata per i motivi precedentemente accennati. In aggiunta, l'inseguimento di traiettorie sia a livello spaziale sia a livello temporale diviene ancora più complesso quando si considerano riferimenti caratterizzati da dinamiche veloci: infatti, in presenza di formulazioni MPC tradizionali (ossia con la semplice inclusione di un integratore all'interno della sua definizione), si ottengono ottime prestazioni in termini di inseguimento spaziale ma pessime prestazioni in termini di inseguimento temporale a causa della presenza di un ritardo temporale. Per far fronte a tale aspetto negativo, l'approccio proposto include la dinamica del riferimento tempo-variante all'interno del processo di ottimizzazione vincolato attraverso l'utilizzo di un sistema in spazio di stato autonomo, come proposto nel capitolo 2, sfruttando quindi il già citato MPC-ERD, dove l'inclusione del riferimento all'interno della progettazione del controllore è svolta grazie alla tecnica denominata DMD ("Dynamic Mode Decomposition"). Un ulteriore aspetto innovativo di questo capitolo è dato dal fatto che i limiti operativi dei motori in termini di coppia e velocità, descritti dalla loro curva caratteristica, sono inclusi anch'essi all'interno della risoluzione del problema di ottimizzazione vincolata, agendo come vincoli tempo-varianti per le tensioni dei cavi. In aggiunta, sono inclusi ulteriori vincoli nello stesso problema di ottimizzazione, come i limiti (minimo e massimo) delle tensioni e delle rispettive derivate temporali.

L'efficacia dell'MPC-ERD è stata validata, a livello simulativo, attraverso il modello dinamico di un robot a cavi paralleli in configurazione sospesa a tre gradi di libertà e i risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti sia in presenza di un MPC tradizionale (caratterizzato dalla sola inclusione di un integratore) sia di un MPC classico (sprovvisto di integratore). Oltre ad ereditare gli aspetti positivi dei controllori MPC tradizionali, in cui si considera l'inclusione dell'integratore, il controllore proposto MPC-ERD è in grado di assicurare un inseguimento preciso delle traiettorie tempo-varianti di riferimento sia a livello spaziale sia a livello temporale, ottenendo errori di inseguimento e ritardi temporali trascurabili.

A meno che non vengano utilizzati controllori avanzati, come il già citato e proposto MPC-ERD, i risultati dei capitoli 3 e 4 hanno sottolineato il bisogno fondamentale di utilizzare algoritmi di inversione dinamica per migliorare le prestazioni dei sistemi a catena chiusa. Considerando tale ambito, risulta doveroso sottolineare che la soluzione del problema di dinamica inversa risulta essere piuttosto banale per sistemi pienamente attuati ma, sfortunatamente, non risulta essere altrettanto semplice per sistemi sotto-attuati. Pertanto, per andare oltre i limiti che affliggono attualmente la ricerca di questo settore, il capitolo 6 propone un approccio migliorato di inversione dinamica per il controllo in catena aperta di sistemi multi-corpo sotto-attuati, ossia meccanismi o robot dove il numero di attuatori indipendenti è inferiore rispetto al numero di gradi di libertà. Tale metodo sfrutta il concetto relativo al partizionamento delle coordinate indipendenti in coordinate attuate e non attuate

(attraverso la decomposizione QR), insieme all'utilizzo di un'uscita descritta tramite combinazione lineare, ottenendo in tal modo la formulazione della dinamica interna del sistema a fase non minima con l'obiettivo di stabilizzarla attraverso opportuna ridefinizione del segnale di uscita. Successivamente, il modello algebrico esatto relativo al sottosistema attuato viene invertito, permettendo così la valutazione delle forze di controllo richieste per l'esecuzione della traiettoria desiderata, a valle di una piccola approssimazione e senza il bisogno di pre-attuazione.

L'efficacia del metodo proposto è stata valutata attraverso tre casi simulativi, confrontando i risultati ottenuti con quelli derivanti dall'utilizzo di tecniche già presenti in letteratura. Infine, l'approccio proposto è stato validato anche sperimentalmente considerando un braccio robotico sotto-attuato a due gradi di libertà.

Dato che i robot industriali sono caratterizzati da controllori co-locati, dove non si hanno misure dirette del carico, l'unico modo per ottenere ottime prestazioni in termini di inseguimento di traiettorie spaziali e temporali è rappresentato dall'implementazione di un'opportuna pianificazione del moto. Pertanto, l'idea proposta nel capitolo 6 è stata considerata sotto un altro punto di vista, dandole quindi una nuova interpretazione, con l'obiettivo di proporre una tecnica di pianificazione del moto in presenza di sistemi sotto-attuati. Normalmente, come già accennato, i robot industriali sono caratterizzati da controllori co-locati e, dato che il carico non è direttamente misurato, l'unico modo per ottenere alte prestazioni dinamiche è quello che prevede opportune pianificazioni del moto, soprattutto quando bassi rapporti di inerzia caratterizzano il sistema. Pertanto, l'approssimazione dell'uscita descritta tramite combinazione lineare, anche se già particolarmente efficace di per sé, è stata ulteriormente migliorata sfruttando la formulazione relativa all'uscita separabile. Questa formulazione potrebbe essere direttamente sfruttata per migliorare ulteriormente l'algoritmo di inversione dinamica proposto nel capitolo 6, anche se esso stesso presenta già prestazioni elevate dal punto di vista di inseguimento di traiettorie spaziali e temporali, tuttavia, focalizzando l'attenzione su sistemi robotici industriali, il capitolo 7 propone una tecnica di pianificazione del moto per l'inseguimento preciso di traiettorie tempo-varianti in un carro ponte spaziale sotto-attuato a fase non minima. Oltre ad avere un numero di attuatori indipendenti inferiore rispetto al numero di gradi di libertà, il controllo del movimento del carico presenta una dinamica interna instabile che porterebbe alla divergenza della soluzione del problema di dinamica inversa se quest'ultimo fosse svolto come nel caso di sistemi pienamente attuati. Come precedentemente menzionato, questo capitolo quindi sfrutta la rappresentazione dell'uscita controllata come una funzione separabile delle coordinate attuate (che indicano la traslazione della piattaforma) e non attuate (rappresentate dagli angoli di oscillazione del carico) in modo da formulare facilmente la dinamica interna del sistema, senza nessuna approssimazione, e di conseguenza permettendone lo studio della stabilità. Successivamente, la ridefinizione dell'uscita viene utilizzata a livello di dinamica interna con l'obiettivo di stabilizzare quest'ultima, portando quindi ad avere delle azioni di controllo di comando stabili e causali per la traslazione della piattaforma. Oltre a proporre la formulazione teorica di questo metodo innovativo, questo capitolo include sia la validazione numerica sia quella sperimentale tramite l'utilizzo di un sistema robotico presente in laboratorio. Al fine di ottenere una validazione più completa, è stato svolto anche il confronto con una tecnica riguardante lo stato dell'arte attuale. I risultati mostrano chiaramente che, grazie al metodo proposto, è stato possibile ottenere un inseguimento notevolmente preciso delle traiettorie di riferimento anche a livello sperimentale.

Considerazioni finali

A causa della proprietà di sotto-attuazione, che sta caratterizzando sempre di più gli attuali sistemi meccanici e mecatronici, e che normalmente può comparire intenzionalmente, accidentalmente o strutturalmente, i sistemi sotto-attuati stanno riscontrando un interesse sempre più grande nel campo della ricerca. Dato che essi caratterizzano un'area di ricerca particolarmente difficile dal punto di vista della progettazione del sistema di controllo, l'obiettivo di questa tesi è quello di proporre un insieme di strumenti utili al fine di ottenere

ottime prestazioni in presenza di sistemi multi-corpo sotto-attuati, sia in termini di inseguimento spaziale sia in termini di inseguimento temporale. Più precisamente, la prima parte della tesi si focalizza sulla progettazione del sistema di controllo in catena chiusa, proponendo un innovativo controllore predittivo MPC capace di assicurare errori di inseguimento trascurabili grazie all'inclusione della dinamica del riferimento all'interno del problema di ottimizzazione vincolato. Rimanendo nel campo di ricerca dei controllori in catena chiusa, la seconda parte mostra come sia possibile assicurare alte prestazioni in presenza di un sistema sotto-attuato caratterizzato da ritardo temporale; questo argomento è particolarmente importante dato che la presenza di ritardo in un sistema a catena chiusa può portare ad avere un'equazione caratteristica del sistema avente radici latenti, le quali possono andare a minacciare la stabilità del sistema. Pertanto, è stato presentato un algoritmo di controllo con l'obiettivo di ottenere le prestazioni desiderate e, allo stesso tempo, assicurare un adeguato livello di robustezza. Infine, la terza parte focalizza l'attenzione sulla progettazione di controllori a catena aperta, che sfruttano quindi il concetto di inversione dinamica; in particolar modo viene mostrato come sia possibile effettuare l'inversione del modello dinamico in presenza di sistemi sotto-attuati.

In conclusione, risulta utile sottolineare il fatto che l'utilizzo di tutti i metodi proposti in questa tesi non è precluso solamente ai casi sperimentali considerati ma, invece, possono essere facilmente sfruttati per ottenere ottime prestazioni dinamiche in presenza della maggior parte dei sistemi multi-corpo sotto-attuati che caratterizzano l'ambiente di automazione industriale odierno.

Jason Bittner