



Università degli Studi di Salerno

Dottorato di Ricerca in Informatica e Ingegneria dell'Informazione
Ciclo 32 – a.a 2018/2019

TESI DI DOTTORATO / PH.D. THESIS

Dynamic Programming for Optimal Planning and Control of Redundant Robot Manipulators

ENRICO FERRENTINO

SUPERVISOR:

PROF. PASQUALE CHIACCHIO

PHD PROGRAM DIRECTOR: **PROF. PASQUALE CHIACCHIO**

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione ed Elettrica
e Matematica Applicata
Dipartimento di Informatica

Abstract

Kinematically redundant robots possess more degrees of freedom than those strictly required to execute a given task. Such a characteristic gives the system a higher degree of dexterity and mobility that can be exploited to optimize performance indices of interest. Kinematic redundancy can be found in anthropomorphic serial chains, humanoids, mobile manipulators (terrestrial, aerial), parallel robots and systems of cooperating robots. The optimization problem that looks into the exploitation of redundancy to optimize a given performance index is commonly referred to as *redundancy resolution*.

Many robotic tasks require to follow a specific path, such as in welding, cutting, gluing and in some assembly and disassembly tasks. This is opposed to *point-to-point* motion, that is rather typical in pick-and-place operations. The definition of the speed with which the path is tracked is also a decision variable that, in most applications, is necessary to optimize. The criterion to follow could be related to time minimization, but also tracking accuracy and, more generally, quality measures defined for the specific process. The optimization problem that looks into the definition of velocity along a given path is commonly referred to as *trajectory planning* or *time-parametrization*.

Nowadays, many applications require the robots to live and operate in unstructured, unknown and highly-dynamical environments, which undoubtedly shifts the attention of research towards real-time planning and control. However, there still are situations, that are quite frequent in reality, where off-line planning is required, while the underlying process is not fully optimized. Indeed, one of the most frequent employments of anthropomorphic arms in manufacturing industries still concerns the execution of repetitive tasks in structured environments, where the task is planned once and executed cyclically. In the aerospace sector, off-line planning instances exist in the mission design phase for feasibility and budget assessments. Also, some sequences for in-orbit manipulation

can be pre-planned in an optimal way. In missions that are characterized by windowed communications, a long planning time is usually available on ground to deliver more efficient commands to the spaceborne asset. On the contrary, when the domain requires highly-reactive behaviors, off-line planning can help measuring the performance of on-line algorithms so as to estimate the room available for improvement. The scenarios just described are the domain of this thesis.

Redundancy resolution and trajectory planning have been mostly treated as two independent, consecutive optimization processes. First, a workspace path is given, that is mapped, through inverse kinematics, in the joint space (possibly optimizing a geometric quality index), then, the joint-space path is time-parametrized to yield a trajectory (respecting constraints and possibly optimizing a different quality index), that can be executed through motion control at joint level. The optimization performed at the former stage can be functional to the optimization performed at the latter. Overall, the two processes “cooperate” to achieve a common objective.

Unfortunately, in an attempt to reach the global optimum, the resolution of two independent globally-optimal problems does not guarantee the achievement of the overall global optimum. Indeed, if the objective is to optimize a generic dynamic index, e.g., traveling time, but the time along the path is only defined at the level of trajectory planning, there is no possibility for kinematic redundancy resolution to achieve such a goal. Hence, the objective of this thesis is to provide a unified solution for both optimization problems, so that kinematic redundancy is effectively exploited for the minimization/maximization of the objective function defined at trajectory planning level.

In the off-line planning applications that motivate this thesis, although the environment where the robot operates is structured, static, known or partially known, not all the optimization techniques can capture the complexity of the real system and some show greater flexibility than others. This thesis adopts dynamic

programming as the main underlying methodology and central idea to cope with the complexity of reality. Also, because of its employment, in previous research, for both the optimization problems described above, it naturally arises as the unifying approach. Dynamic programming is extremely flexible in the accommodation of arbitrary constraints and objective functions and, compatibly with the available planning time, can guarantee global optimality. When applied to real systems, it allows describing the constraints at hand and no conservative hypotheses are necessary. Differently from many other optimization techniques, where more constraints make the search of the optimum cumbersome, in dynamic programming they are beneficial and allow reducing the computational complexity.

The thesis specifically addresses the complexity issue by identifying all the aspects of the optimization problems that allow to make the algorithms more efficient. In particular, the study of the topological spaces associated to the inverse kinematic mapping is of remarkable theoretical and practical interest. In fact, it allows to draw important conclusions about redundant systems, paving the way to the design of control algorithms that are more flexible and efficient, while preserving global optimality.

The effectiveness of the proposed methodology, for both the optimization problems separately and the unified optimization problem, is demonstrated on a 7-DOF robotic arm, both in simulation and in reality. The issues associated to the execution on real hardware are specifically addressed by post-processing of the control signals, in an open-source architecture based on ROS.

Abstract

Un robot ridondante possiede più gradi di libertà di quelli strettamente necessari ad eseguire il task assegnato. Questa caratteristica fornisce al sistema migliore destrezza e mobilità, che possono essere sfruttate per ottimizzare indici di performance di interesse. È possibile trovare ridondanza cinematica nei robot antropomorfi, umanoidi, manipolatori mobili (terrestri, aerei), robot paralleli e sistemi di robot cooperanti. Il problema di ottimizzazione che punta a sfruttare la ridondanza per ottimizzare un dato indice di performance è di solito chiamato *risoluzione della ridondanza*.

Molti task robotici richiedono l'inseguimento di un percorso specifico, come nelle operazioni di saldatura, taglio, incollaggio ed in alcune operazioni di montaggio e smontaggio. Ciò si contrappone a moti punto-punto, che invece sono tipici di applicazioni di pick-and-place. Anche la velocità con cui il percorso viene seguito spesso costituisce una variabile decisionale che, in molte applicazioni, è necessario ottimizzare. Il criterio da seguire potrebbe essere la minimizzazione del tempo, l'accuratezza di inseguimento, oppure, più in generale, indici di qualità definiti per processi specifici. Il problema di ottimizzazione che punta alla definizione della velocità su di un percorso è di solito chiamato *pianificazione di traiettoria* oppure *parametrizzazione temporale*.

Oggi giorno, molte applicazioni richiedono che i robot vivano ed operino in ambienti non strutturati, sconosciuti ed altamente dinamici, che indubbiamente spostano l'attenzione della ricerca verso il controllo e la pianificazione in tempo reale. Ciononostante, esistono ancora situazioni, che sono abbastanza frequenti nella pratica, in cui è richiesta una pianificazione off-line. Allo stesso tempo, i processi che sottintendono a tale tipologia di pianificazione non sono ancora completamente ottimizzati. Infatti, uno degli impieghi più comuni dei bracci manipolatori antropomorfi nell'industria manifatturiera ha ancora a che fare con l'esecuzione di compiti che sono pianificati una volta e continuamente ripetuti in modo ciclico. Nel settore aerospaziale, invece, la pianificazione off-line è utiliz-

zata nella fase di progetto della missione per studi di fattibilità e valutazione delle risorse associate, oppure, nella manipolazione robotica in orbita, alcune sequenze possono essere pre-pianificate in modo ottimo. Nelle missioni in cui i satelliti di comunicazione e le stazioni di terra non sono sempre in visibilità reciproca, di solito il tempo disponibile per la pianificazione, nei centri di controllo, si allunga, dando la possibilità di fornire comandi più efficienti ai robot spaziali. Al contrario, quando il dominio applicativo richiede comportamenti altamente reattivi, la pianificazione off-line può ancora essere adoperata per misurare le performance degli algoritmi in tempo reale e stimare il loro margine di miglioramento. Gli scenari appena descritti costituiscono il contesto di questa tesi.

La risoluzione della ridondanza e la pianificazione di traiettoria sono stati trattati principalmente come due problemi di ottimizzazione indipendenti e consecutivi. Dapprima è assegnato un percorso nello spazio operativo, che è mappato, tramite inversione cinematica, nello spazio giunti (possibilmente ottimizzando un indice di qualità geometrico), successivamente, le informazioni temporali sono assegnate al percorso spazio giunti per ottenere una traiettoria (che rispetta i vincoli ed eventualmente ottimizza un altro indice di qualità), che può essere eseguita tramite controllo. La prima ottimizzazione può essere funzionale alla seconda, affinché i due processi cooperino per perseguire un obiettivo comune.

Purtroppo, la risoluzione di due problemi globalmente-ottimi indipendenti non garantisce il raggiungimento dell'ottimo globale complessivo. Infatti, se l'obiettivo è ottimizzare un generico indice dinamico, ad esempio il tempo di completamento dell'attività, ma l'informazione temporale è definita soltanto a livello di pianificazione di traiettoria, non c'è alcuna possibilità per la risoluzione della ridondanza di raggiungere tale obiettivo. Di conseguenza, lo scopo di questa tesi è fornire una soluzione unificata per entrambi i problemi di ottimizzazione, affinché la ridondanza cinematica sia effettivamente adoperata per la minimizzazione/massimizzazione della funzione obiettivo definita a livello di pianificazione di traiettoria.

Nelle applicazioni di pianificazione off-line di interesse per questa tesi, sebbene l'ambiente dove il robot opera sia strutturato, statico, noto o parzialmente noto, non tutte le tecniche di ottimizzazione riescono a catturare la complessità del sistema reale e alcune mostrano una maggiore flessibilità di altre. Questa tesi adotta la programmazione dinamica come principale metodologia per gestire la complessità delle applicazioni reali. Inoltre, siccome è stata impiegata, in precedenti lavori scientifici, per entrambi i problemi di ottimizzazione descritti, essa si presenta naturalmente come l'approccio unificante. La programmazione dinamica è estremamente flessibile rispetto all'inclusione di vincoli e funzioni obiettivo arbitrarie e, compatibilmente con il tempo disponibile per la pianificazione, garantisce l'ottimalità globale. Quando è applicata a sistemi reali, permette di descrivere accuratamente i vincoli, per cui non sono di solito necessarie ipotesi conservative. A differenza di molte altre tecniche di ottimizzazione, quando la presenza di ulteriori vincoli rende complessa la ricerca dell'ottimo, nella programmazione dinamica, essi sono benefici perché permettono di ridurre la complessità computazionale.

La tesi affronta in modo particolare il problema della complessità identificando tutti quegli aspetti dei due problemi di ottimizzazione che permettono di rendere gli algoritmi più efficienti. In particolare, lo studio degli spazi topologici associati alla relazione cinematica inversa è di notevole interesse teorico e pratico. Infatti, esso consente di trarre importanti conclusioni sui sistemi ridondanti, battendo la strada al progetto di algoritmi di controllo più flessibili ed efficienti, senza rinunciare all'ottimalità globale.

L'efficacia della metodologia proposta, per entrambi i problemi di ottimizzazione, considerati separatamente ed in modo unificato, è dimostrata su un braccio robotico a 7 gradi di libertà, sia in simulazione che nella realtà. In particolare, i problemi associati all'esecuzione sull'hardware reale sono affrontati tramite post-processamento dei segnali di controllo, in un'architettura open-source basata su ROS.