

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102021000024899
Data Deposito	29/09/2021
Data Pubblicazione	29/03/2023

Classifiche IPC

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	25	J	9	16

Titolo

METODO PER IL CONTROLLO IN AUTOAPPRENDIMENTO DI UN SISTEMA ROBOTIZZATO
CHIUSO E RELATIVO IMPIANTO DI LAVORAZIONE

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"METODO PER IL CONTROLLO IN AUTOAPPRENDIMENTO DI UN SISTEMA
ROBOTIZZATO CHIUSO E RELATIVO IMPIANTO DI LAVORAZIONE"

di GAIOTTO AUTOMATION S.P.A.

di nazionalità italiana

con sede: VIA SELICE PROVINCIALE 17/A

40026 IMOLA (BO)

Inventori: FERRAGUTI Federica, BERTULETTI Mattia, GAMBAZZA
Mattia, RAGAGLIA Matteo, FANTUZZI Cesare

*** **

SETTORE DELLA TECNICA

La presente invenzione è relativa ad un metodo per il controllo, in particolare in autoapprendimento, di un sistema robotizzato chiuso, in particolare comprendente un robot manipolatore, e ad un relativo impianto di lavorazione.

La presente invenzione trova vantaggiosa, ma non esclusiva applicazione nel campo della ceramica, più in particolare della smaltatura di manufatti ceramici, cui la trattazione che segue farà esplicito riferimento senza per questo perdere di generalità.

CONTESTO DELL'INVENZIONE

Nel campo della lavorazione di manufatti ceramici è noto utilizzare dei dispositivi robotizzati supportanti teste di spruzzo per effettuare la verniciatura e/o

smaltatura delle superfici.

Questo tipo di approccio, utilizzato anche in altri ambiti come la saldatura, presenta una elevata versatilità ed efficacia ed ha portato ad un aumento nella velocità di produzione e a miglioramenti nella ripetibilità e precisione del processo industriale.

Negli ultimi anni l'utilizzo dei manipolatori industriali (di seguito anche detti semplicemente robot) è cambiato radicalmente, passando da un'idea di segregazione completa dello spazio di lavoro (ottenuta attraverso barriere fisiche) a uno scenario in cui robot e operatori umani condividono lo stesso spazio di lavoro e collaborano anche fianco a fianco. In questo contesto, i robot stanno diventando elementi chiave per aumentare la competitività della produzione, poiché l'interazione fisica uomo-robot (pHRI) può sicuramente aiutare le imprese a raggiungere una maggiore flessibilità produttiva per far fronte a prodotti in rapida evoluzione. Tuttavia, l'adozione diffusa di tecnologie robotiche è ancora minata da alcuni fattori ben noti, tra cui la natura intrinsecamente complessa e dispendiosa in termini di tempo della programmazione dei robot.

In considerazione del fatto che un medesimo robot può procedere alla verniciatura e/o smaltatura di manufatti di diversa foggia, il modo in cui viene "insegnato" come agire

è diventato una fase di lavoro sempre più importante e dovrebbe essere il più possibile semplice e intuitiva.

I metodi tradizionali per la programmazione di manipolatori industriali consistono tipicamente nell'utilizzo di palmari (*teach pendant*) per la programmazione "punto a punto" (PTP) o nella simulazione dell'attività del manipolatore all'interno di un ambiente di programmazione "offline".

Nel primo caso, non solo l'operatore deve imparare ad utilizzare in maniera appropriata il *teach pendant* ed il linguaggio di programmazione robot, ma lo stile di programmazione punto a punto (*point to point*) intrinseco di questi apparati è efficiente solo per movimenti particolarmente semplici. In particolare, per programmare il robot va utilizzato il robot stesso (ovvero viene generato un fermo di produzione) e la programmazione è piuttosto macchinosa (è necessario spostare il robot, a velocità ridotte cosiddette "collaborative", in ogni punto del percorso e salvare la sua posizione); e per poter valutare la bontà del risultato va completato il programma e poi eseguito; se il risultato non è soddisfacente, vanno ripetute queste operazioni.

Nel secondo caso (programmazione "off-line"), invece, è assolutamente necessaria la conoscenza del linguaggio di programmazione specifico della piattaforma (e/o di un

ambiente di programmazione dedicato, ad esempio un programma CAD 3D), richiedendo quindi all'operatore umano delle conoscenze specifiche e solitamente eccessive per la mansione di operatore di macchina.

I metodi di programmazione "off-line" e "PTP" sono complessi e laboriosi e ciò li rende particolarmente inefficienti per la produzione di lotti di piccole e medie dimensioni.

Per superare queste carenze, sono state sviluppate strategie di programmazione in autoapprendimento generalmente definite come programmazione "walk-through" (indicata anche come programmazione "lead-through" o "guida manuale"), con le più diverse applicazioni pratiche, come ad esempio spruzzatura o saldatura. Queste strategie di programmazione sono caratterizzate dal fatto che l'operatore afferra il manipolatore e lo conduce manualmente sul percorso desiderato fino alle posizioni desiderate, senza alcuna conoscenza preventiva dello specifico linguaggio di programmazione e/o delle funzionalità offerte dallo specifico palmare (*teach pendant*). Durante la fase di apprendimento, una unità di controllo (di seguito detta anche controllore) del robot registra i punti intermedi o l'intera traiettoria imposta dall'operatore umano, in modo che il manipolatore stesso possa successivamente riprodurre in autonomia tale movimento desiderato.

Generalmente, le architetture di programmazione in autoapprendimento si basano su due elementi chiave: un sistema di rilevamento (sensore) e un algoritmo di controllo dell'ammettenza (o impedenza) gestito dall'unità di controllo (o controllore). Il sistema di rilevamento è responsabile della misurazione delle forze/coppie di interazione esercitate dall'operatore sul manipolatore.

Il suddetto obiettivo può essere raggiunto principalmente in due modi: sfruttando il rilevamento diretto della coppia ai giunti del manipolatore (il quale, tuttavia, spesso non è reso disponibile al cliente dai produttori di manipolatori o è influenzato da una scarsa frequenza e/o risoluzione dei dati); oppure montando un apposito sensore (ad esempio una cella di carico dedicata) sull'end effector (ovvero la porzione/elemento/link terminale, ovvero dopo l'ultimo giunto) del manipolatore.

Tuttavia, la necessità di rilevare con precisione quanto imposto dall'operatore, comporta necessariamente problemi sia di costo, sia di robustezza dell'hardware. Infatti, i manipolatori dotati nativamente di un sistema di rilevamento della forza/coppia esercitata dall'operatore sono generalmente anche caratterizzati da costi elevati e carico limitato.

Nel controllo dei manipolatori industriali, ad esempio in PCT/IB2017/055972 sono noti algoritmi di controllo

dell'ammettenza, i quali sono responsabili della traduzione delle misurazioni di forza/coppia impresse da un operatore ad un apposito sensore, in spostamenti corrispondenti nello spazio dei giunti (nel caso in cui siano disponibili sensori di coppia su ciascun giunto), o nello spazio cartesiano (nel caso in cui sia presente un sensore di carico), o entrambi. In questi ultimi due casi, comunque, il riferimento cartesiano viene immediatamente convertito, tramite cinematica inversa, in corrispondenti riferimenti nello spazio dei giunti.

Allo scopo di attuare tali riferimenti, viene richiesta un'architettura di controllo "aperta" (o sistema aperto) che consenta all'algoritmo di controllo dell'ammettenza di sovrascrivere direttamente la posizione del giunto ed i rispettivi riferimenti di velocità. In altre parole, secondo lo stato dell'arte, come illustrato in PCT/IB2017/055972, l'autoapprendimento viene generalmente effettuato fornendo a dei sistemi aperti riferimenti di posizione, o di posizione e velocità dei giunti del manipolatore in uno streaming alla frequenza in tempo reale del sistema di controllo del manipolatore medesimo. In sostanza, a seguito del controllo di ammettenza, l'unità di controllo elabora immediatamente, tramite cinematica inversa, la posizione da comandare a ciascun giunto del robot manipolatore.

In linea teorica, la possibilità di interfacciarsi

direttamente con un controllo di basso livello in tempo reale rende preferibile la soluzione di un'architettura di controllo aperta, soprattutto quando l'autoapprendimento viene utilizzato per registrare traiettorie continue ad alta velocità (tramite il suddetto streaming). Tuttavia, questo approccio determina delle criticità dal punto di vista della sicurezza. In particolare, per questi motivi, negli standard di sicurezza per l'autoapprendimento di manipolatori industriali è stato definito un limite di velocità cartesiano di 250 mm/s. Sebbene questa limitazione possa essere adatta per scenari in cui è necessario memorizzare solo i punti intermedi, la stessa può impedire l'utilizzo della programmazione in autoapprendimento quando è necessario registrare traiettorie continue eseguite ad alta velocità. Ad esempio, i robot di spruzzatura non possono essere guidati manualmente a velocità cartesiane basse, poiché il loro movimento deve essere fluido e sincronizzato con i parametri del sistema di spruzzatura, i quali non possono a loro volta (comprendendo spesso anche valvole on/off) essere modulati cinematicamente rispetto al tempo. Le stesse osservazioni si possono effettuare anche su altri tipi di applicazione, come la saldatura, la levigatura, ecc.

È inoltre da considerare che la maggioranza dei controllori di manipolatori industriali non presenta un'architettura aperta. Ciò significa che, una volta

acquistato un manipolatore industriale, non è possibile forzare il manipolatore stesso a seguire una traiettoria specifica trasmettendo in tempo reale la posizione del giunto e i segnali di riferimento di velocità al suo controllore in funzione della forza/coppia rilevata dal sistema di rilevazione. Infatti, con la dicitura sistema "chiuso" si intendono la maggior parte dei manipolatori industriali attualmente in commercio, nei quali non è possibile sovrascrivere direttamente la posizione, o la posizione e la velocità dei giunti del manipolatore.

Scopo della presente invenzione è quello di fornire un metodo per il controllo, in particolare in autoapprendimento, di un sistema robotizzato chiuso, in particolare di un manipolatore industriale ed un relativo impianto di lavorazione, i quali permettano di superare, almeno parzialmente, gli inconvenienti dell'arte nota e siano, nel contempo, di facile ed economica realizzazione.

SOMMARIO

Secondo la presente invenzione vengono forniti un metodo per il controllo, in particolare in autoapprendimento, di un sistema robotizzato chiuso, in particolare comprendente un robot manipolatore ed un impianto di lavorazione secondo quanto rivendicato nelle rivendicazioni indipendenti che seguono e, preferibilmente, in una qualsiasi delle rivendicazioni dipendenti

direttamente o indirettamente dalle rivendicazioni indipendenti.

Le rivendicazioni descrivono forme di realizzazione preferite della presente invenzione formando parte integrante della presente descrizione.

Nel presente testo per "coppia" si intende "momento di una forza" (torque) o comunque un'altra grandezza contenente il (più precisamente, funzione del) momento di una forza. "Momento di una forza" (o "momento meccanico") ha il suo comune significato di attitudine di una forza ad imprimere una rotazione ad un corpo rigido attorno ad un punto (nel piano) o ad un asse (nello spazio) quando questa non è applicata al suo centro di massa.

Nel presente testo per "forza" si intende anche (oltre al significato dato normalmente a questo termine, ovvero al significato di imprimere una traslazione ad un corpo rigido lungo l'asse di applicazione) un'altra grandezza contenente la (più precisamente, funzione della) forza. Secondo alcune forme d'attuazione, per "forza" si intende forza secondo il suo normale significato.

BREVE DESCRIZIONE DELLE FIGURE

L'invenzione viene di seguito descritta con riferimento ai disegni annessi, che ne illustrano alcuni esempi d'attuazione non limitativi, in cui:

- la figura 1 è una vista prospettica e con

particolari asportati per chiarezza di un impianto in accordo con la presente invenzione;

- la figura 2 è una vista prospettica ed in scala ingrandita di un particolare della figura 1 in una seconda configurazione;

- la figura 3 è un diagramma a blocchi schematico di un sistema di controllo dell'impianto della figura 1.

DESCRIZIONE DETTAGLIATA

In accordo con un primo aspetto della presente invenzione, nella figura 1, con 1 è indicato nel suo complesso un impianto di lavorazione per un sistema 3 robotizzato chiuso, in particolare, non limitativamente, per il trattamento di un manufatto 2. L'impianto 1 comprende un sistema robotizzato 3, il quale, a sua volta, comprende un elemento terminale 4 (end effector), il quale è configurato per effettuare una lavorazione o interagire con un articolo in produzione (ad esempio il manufatto 2).

Nella non limitativa forma di attuazione delle figure 1 e 2, l'elemento terminale 4 è una testa di spruzzo, la quale è configurata per emettere un getto di una sostanza per la copertura di almeno una parte della superficie del manufatto 2. In altre forme di attuazione non limitative e non illustrate, l'elemento terminale 4 è una testa di saldatura, una testa di presa, una pinza o un qualunque altro strumento di lavorazione.

Vantaggiosamente, l'impianto 1 comprende un robot manipolatore 5, il quale è mobile con almeno tre (in particolare almeno quattro, più in particolare sei) gradi di libertà e sul quale è montato l'elemento terminale 4 (ad esempio la testa di spruzzo). L'impianto comprende inoltre un sistema di controllo 6 (figura 3) ed un gruppo di comando 7.

Il sistema di controllo 6 comprende un'unità di memorizzazione 8 ed è configurato per comandare il movimento del robot manipolatore 5 per muovere l'elemento terminale 4 (ovvero la testa di spruzzo). In particolare, il sistema di controllo 6 è anche atto a regolare l'azionamento di uno strumento montato a bordo dell'elemento terminale 4 (ad esempio la testa di spruzzo).

Il gruppo di comando 7 è configurato per essere operato da un operatore (non illustrato) per trasferire indicazioni di movimento per il robot manipolatore 5. In particolare, il gruppo di comando 7 è anche configurato per trasferire indicazioni di azionamento per l'elemento terminale 4 (ad esempio la testa di spruzzo).

In particolare, il robot manipolatore 5 (figure 1 e 2) comprende più tratti (links) tra loro collegati in successione. Ciascun tratto è ruotabile rispetto al precedente attorno da un rispettivo asse A di rotazione. La rotazione attorno a ciascuno degli assi A rappresenta un

grado di libertà del robot manipolatore 5. Nella forma d'attuazione illustrata, il robot manipolatore 5 ha sei gradi di libertà e, più precisamente, presenta sei assi A di rotazione.

Il robot manipolatore 5 è tipicamente un robot antropomorfo di tipo industriale e può ad esempio essere il robot GA-OL della Gaiotto Automation SpA. Il robot manipolatore 5 può avere anche più di sei gradi di libertà (in particolare, più di sei assi A di rotazione). In alcuni casi non limitativi, i gradi di libertà possono essere cinque assi di rotazione ed una traslazione (ad esempio orizzontale o verticale).

Nella non limitativa forma di attuazione delle figure 1 e 2, il gruppo di comando 7 comprende un dispositivo di manipolazione 9, sul quale, in uso, l'operatore esercita una forza ed una coppia F_c (anche detta forza di contatto - figura 3); un sensore 10, il quale è collegato all'elemento terminale 4 ed è atto a rilevare la forza e la coppia F_s applicate al dispositivo di manipolazione 9; ed un sistema di elaborazione 11, il quale è atto a fornire indicazioni di movimento cartesiane per il robot manipolatore 5 in funzione di quanto rilevato dal sensore 10 (più precisamente in funzione della forza e coppia F_s rilevate) ed a seguito di un controllo AC di ammettenza (o impedenza).

In particolare, il sensore 10 ha (almeno) tre

(preferibilmente almeno quattro, in particolare sei) gradi di libertà ed è capace di misurare (almeno) tre forze e tre coppie (in un sistema di riferimento cartesiano). Il sensore 10 può essere un qualunque dispositivo noto in grado di svolgere le funzioni sopra descritte.

Secondo specifiche forme d'attuazione non limitative, il sensore 10 è, ad esempio, l'FTSens che, misurate tre forze e tre coppie, è in grado di trasmetterle in formato digitale su una rete CAN. FTSens è stato sviluppato dall'IIT (Istituto Italiano di Tecnologia) di Genova. In questo caso, le misure vengono rilevate grazie ad una tecnologia estensimetrica, basata sulla deformazione di estensimetri (di tipo elettrico/a resistenza) posti all'interno del corpo del sensore.

Secondo altre specifiche forme di attuazione non limitative, il sensore 10 è, ad esempio, il sensore FT Axia 80, sviluppato da ATI Automation; il quale effettua lo scambio di dati via protocollo EtherCAT®.

L'unità di memorizzazione 8 è atta a memorizzare i movimenti q_{robot} seguiti dal robot manipolatore 5 mentre l'elemento terminale 4 (ovvero la testa di spruzzo) viene mossa dall'operatore mediante il gruppo di comando 7. Il sistema di controllo 6 è atto a comandare il movimento del robot manipolatore 5 in funzione dei movimenti q_{robot} memorizzati dall'unità di memorizzazione 8. In particolare,

il sistema di controllo 6 è atto a comandare il movimento del robot manipolatore 5 in modo che il robot manipolatore 5 (e la testa di spruzzo 4) ripeta sostanzialmente i movimenti q_{robot} memorizzati dall'unità di memorizzazione 8, più in particolare in modo che l'elemento terminale 4 (la testa di spruzzo) ripeta sostanzialmente i movimenti eseguiti mentre l'operatore muove l'elemento terminale 4.

In particolare, nel presente testo per "movimento" o "movimenti" si intende un percorso e la velocità lungo il percorso. Più precisamente, il movimento del robot manipolatore 5 è il movimento nello spazio di ciascuna parte mobile del robot manipolatore 5 nello spazio.

In particolare, il dispositivo di manipolazione 9 è montato sul robot manipolatore 5 (più in particolare, sul sensore 10). Vantaggiosamente ma non necessariamente, il dispositivo di manipolazione 9 è montato sul robot manipolatore 5 in corrispondenza (ovvero a bordo) dell'elemento terminale 4, in particolare in corrispondenza di un'estremità del robot manipolatore 5. Più precisamente, il dispositivo di manipolazione 9 è collegato al robot manipolatore 5 attraverso il sensore 10 (che supporta il dispositivo di manipolazione 9). Secondo alcune forme d'attuazione, il sensore 10 è montato sul robot manipolatore 5.

In particolare, il dispositivo di manipolazione 9

comprende almeno una impugnatura 12, la quale è atta ad essere afferrata dall'operatore per muovere il robot manipolatore 5 (e, quindi, l'elemento terminale 4).

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, il dispositivo di manipolazione 9 comprende (almeno) due impugnature 12, le quali sono atte ad essere afferrate dall'operatore per muovere il robot manipolatore 5 (e, quindi, la testa di spruzzo 4) e sono tra loro collegate in modo solidale, in particolare mediante un elemento di collegamento (del dispositivo di manipolazione 9). Più in particolare, l'elemento di collegamento comprende (più precisamente è) una barra trasversale alle impugnature 12. In questi casi, vantaggiosamente ma non necessariamente, la barra trasversale è montata sul sensore 10; più precisamente, la barra trasversale è tra il sensore 10 e la/e impugnatura/e 12.

In particolare, l'elemento terminale 4 è montato sul robot manipolatore 5 mediante un supporto 4', il quale si aggetta dal robot manipolatore 5 (in particolare, da un'estremità del robot manipolatore 5).

Secondo alcune forme d'attuazione (come quella illustrata nelle figure 1 e 2), il supporto 4' presenta una prima estremità collegata al robot manipolatore 5, si estende (verso il basso) oltre il sensore 10 e presenta una zona di accoppiamento (in corrispondenza di una seconda estremità

opposta alla prima estremità) in corrispondenza della quale è collegata la testa di spruzzo 4. Il sensore 10 è disposto tra il dispositivo di manipolazione 9 e la prima estremità. Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, il supporto 4' si estende tra le due impugnature 12. In questi casi, l'elemento terminale 4, ad esempio la testa di spruzzo, è disposta tra le due impugnature 12.

Secondo alternative forme d'attuazione (come quella della figura 9), il supporto 4' si estende dal robot manipolatore 5 sostanzialmente in direzione orizzontale.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, il gruppo di comando 7 (in particolare, il dispositivo di manipolazione 9) comprende dei comandi (ad esempio, dei pulsanti, delle leve ecc.), i quali sono atti ad essere azionati dall'operatore per regolare nel tempo almeno un parametro di funzionamento dell'elemento terminale 4. L'unità di memorizzazione 8 è configurata per memorizzare la regolazione del parametro di funzionamento (e la sua variazione nel tempo); il sistema di controllo 6 è atto a regolare l'azionamento della testa di spruzzo 4 in modo che la regolazione del parametro di funzionamento (e la sua variazione nel tempo) memorizzata venga sostanzialmente ripetuta, in particolare in modo coordinato con i movimenti seguiti dal robot manipolatore 5.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, il

gruppo di comando 7 è atto a fornire indicazioni sul parametro di funzionamento (e la sua variazione nel tempo) al sistema di controllo 6, il quale è atto ad azionare la testa di spruzzo 4 in funzione delle indicazioni ricevute dal gruppo di comando 7.

Vantaggiosamente ma non necessariamente, il parametro di funzionamento è scelto nel gruppo consistente di: regolazione del flusso (quantità nell'unità di tempo) della sostanza per la copertura uscente dalla testa di spruzzo, regolazione del grado di polverizzazione della sostanza per la copertura uscente dalla testa di spruzzo, regolazione dell'ampiezza del getto della sostanza per la copertura uscente dalla testa di spruzzo, regolazione della forma del getto della sostanza per la copertura uscente dalla testa di spruzzo, temperatura e/o durata di una saldatura, pressione e/o ampiezza di una levigatura (ed una loro combinazione).

Il parametro di funzionamento può anche essere semplicemente attivazione (on) e disattivazione (off), ad esempio del getto.

In alcuni casi (e non necessariamente), il gruppo di comando 7 (in particolare, il dispositivo di manipolazione 9) comprende un comando di abilitazione alla movimentazione del robot manipolatore 5 (normalmente chiamato in gergo "uomo morto") e permette di fermare il robot manipolatore 5 in caso di emergenza. Tipicamente, questo comando comprende un

pulsante che deve essere mantenuto premuto dall'operatore affinché il robot manipolatore 5 abbia l'abilitazione a muoversi. Se, in uso, questo pulsante viene rilasciato o premuto troppo, il sistema di controllo 6 provvede a disabilitare la possibilità di movimento del robot manipolatore 5.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, l'impianto 1 (in particolare, il dispositivo robotizzato 3) comprende anche un dispositivo 13 per la movimentazione del manufatto 2; il gruppo di comando 7 (in particolare, il dispositivo di manipolazione 9) comprende un comando (ad es. un pulsante o una leva) atto ad essere azionato dall'operatore per comandare il dispositivo per la movimentazione 13 del manufatto 2. In questi casi, l'unità di memorizzazione 8 è atta a memorizzare la posizione (orientazione) del manufatto 2 impostata dall'operatore (e la sua variazione nel tempo). Il sistema di controllo 6 è atto a regolare l'azionamento del dispositivo 13 per la movimentazione del manufatto 2 sulla base della posizione (orientazione) del manufatto 2 (e la sua variazione nel tempo) memorizzata nell'unità di memorizzazione 8. Più in particolare, il sistema di controllo 6 è atto a regolare l'azionamento del dispositivo 13 per la movimentazione del manufatto 2 in modo da ripetere la posizione (orientazione) del manufatto 2 (e la sua variazione nel tempo) memorizzata

nell'unità di memorizzazione 8.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative (come quella illustrata), il dispositivo 13 comprende una piattaforma 13' rotante, sulla quale, in uso, è disposto il manufatto 2. In particolare, la piattaforma 13' è rotante attorno ad un asse verticale (non illustrato).

Vantaggiosamente ma non necessariamente, il sistema di elaborazione 11 è atto a stimare una forza ed una coppia F_{nc} di non contatto in funzione di componenti fisse e variabili date dal carico (in particolare, del dispositivo di manipolazione 9) di quanto montato sul (più precisamente, supportato dal) sensore 10 (più precisamente, una parte sensibile del sensore 10) ed è atto ad ottenere una forza ed una coppia F^*_c stimate (di quanto applicato dall'operatore sul dispositivo di manipolazione 9) in funzione della forza e coppia F_{ext} rilevate (somma di F_c ed F_{nc}) e della forza e coppia F_{nc} di non contatto stimate. In questi casi, il sistema di elaborazione 11 è atto a fornire indicazioni di movimento cartesiano (in particolare displacements) per il robot manipolatore 5 in funzione della forza e coppia F^*_c stimate dal sistema di elaborazione 11 stesso. In particolare, la forza e la coppia F^*_c vengono stimate sottraendo la forza e la coppia F_{nc} di non contatto dalla forza e coppia F_s rilevate.

In particolare, si noti che tutte forze e coppie sopra

indicate (F_{nc} , F^*_c , F_c e F_{ext}) presentano componenti lungo le tre dimensioni dello spazio cartesiano (ed eventualmente i tre angoli di orientamento spaziale, ad esempio gli angoli di Eulero).

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, le componenti fisse e variabili date dal carico comprendono gravità e forze inerziali e di Coriolis. In particolare, le componenti fisse comprendono la gravità. In particolare, le componenti variabili vengono stimate (almeno in parte) in funzione della velocità angolare ω , dell'accelerazione angolare α , dell'accelerazione lineare $\mathbf{a}$ e dell'inerzia (in particolare, del dispositivo di manipolazione 9) di quanto montato sul (più precisamente, supportato dal) sensore 10.

Vantaggiosamente ma non necessariamente, il sistema di elaborazione 11 comprende un'unità di elaborazione 14, la quale è atta a stimare (calcolare) la velocità angolare ω , l'accelerazione angolare α e l'accelerazione lineare $\mathbf{a}$ in funzione della conformazione per ciascun asse di rotazione A del robot manipolatore 5. Secondo alcune specifiche forme d'attuazione non limitative, l'unità di elaborazione 14 comprende (in particolare è) un filtro di Kalman.

Questi parametri possono essere ottenuti direttamente dagli encoder presenti sul robot manipolatore, oppure attraverso degli accelerometri aggiuntivi posti sul robot manipolatore 5. Risultati sperimentali dimostrano che le

misure derivate dagli encoder sono più accurate.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, il sistema di elaborazione 11 comprende anche un'unità di compensazione 15 la quale è atta a stimare la forza e la coppia F^*_c come sopra descritto. In particolare, l'unità di compensazione 15 è collegata all'unità di elaborazione 14 ed è atta ricevere da essa la velocità angolare ω , l'accelerazione angolare α e l'accelerazione lineare $\mathbf{a}$.

Vantaggiosamente ma non necessariamente, il sistema di elaborazione 11 comprende anche un sistema di controllo 16, il quale è atto a calcolare una posizione di riferimento X_{ref} (la posizione dell'elemento terminale 4 mobile del robot manipolatore 5, sulla quale estremità è in particolare montato il gruppo di comando 7) in funzione della forza e coppia F^*_c (ricevute dalla unità di compensazione 15).

In alcuni casi non limitativi, il sistema di controllo 16 comprende (è) un controllo di ammettenza o un controllo di impedenza. Vantaggiosamente ma non necessariamente, il sistema di controllo 16 comprende (è) un controllo di ammettenza. Il controllo di ammettenza fornisce un alto livello di accuratezza nei task di non contatto.

In particolare, in una sua specifica declinazione, il controllo di ammettenza porta il robot ad interagire con l'ambiente secondo un sistema massa smorzatore caratterizzato dalla seguente equazione:

$$M_d \ddot{x} + D_d \dot{x} = F_{ext} \quad (A)$$

in cui, M_d e D_d sono la matrice di inerzia e di smorzamento desiderate, $\dot{x}$ è la velocità cartesiana e $\ddot{x}$ è l'accelerazione cartesiana.

Tuttavia, dato che l'interazione con l'utente può portare ad instabilità, i parametri del controllo di ammettenza vengono vantaggiosamente ma non necessariamente variati e quindi l'inerzia e smorzamento sono variabili nel tempo e non costanti. Il modello di ammettenza variabile è, secondo alcune forme d'attuazione non limitative, il seguente:

$$M(t) \ddot{x} + D(t) \dot{x} = F_{ext} \quad (B)$$

In particolare, l'impianto 1 (in particolare, il dispositivo robotizzato 3) comprende una unità di adattamento parametri PA configurata per adeguare i parametri di inerzia della matrice $M(t)$ e di smorzamento della matrice $D(t)$ (rispettivamente indicate con M e D nella figura 3) in base al comportamento dinamico dell'operatore umano sul gruppo 7 di comando. In particolare, poiché il robot interagisce con l'operatore, possono verificarsi instabilità nel circuito di controllo, a seconda del comportamento dinamico dell'operatore. Per questo motivo, è stata implementata una strategia per rilevare le oscillazioni in aumento nel comportamento del robot e adattare i parametri del controllo di ammissione per

ripristinare un comportamento stabile desiderato. L'algoritmo di adattamento dei parametri adegua i parametri di inerzia M e di smorzamento D del controllo di ammettenza in funzione della rilevazione di un'oscillazione ascendente tramite un indice di rilevamento ψ , calcolato dallo stesso controllore di ammettenza.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, il sistema di controllo 6 comprende una unità 17 di interpolazione, la quale è configurata per interpolare le posizioni di riferimento X_{ref} in modo da generare una traiettoria desiderata (movimento).

In particolare, il sistema di controllo 6 comprende anche un controllo di posizione 18 il quale è atto a fornire la coppia d'attuazione per muovere il robot manipolatore 5 nella posizione desiderata (in altre parole, per riprodurre la posizione di riferimento X_{ref}).

Si noti che, secondo diverse forme d'attuazione, l'unità di elaborazione 14, l'unità di compensazione 15, il sistema di controllo 16, il sistema di controllo 6 e il controllo di posizione 18 possono essere intesi come dispositivi fisici oppure come parti di un sistema software che operano secondo quanto sopra descritto.

Vantaggiosamente ma non necessariamente l'impianto 1 (in particolare, il dispositivo robotizzato 3) comprende inoltre una unità 19 anti-singularità configurata per

effettuare un controllo di singolarità (*singularity avoidance*) sulle indicazioni di movimento nello spazio cartesiano (X_{ref}) in modo da evitare comportamenti indesiderati e/o potenzialmente pericolosi del robot manipolatore 5.

In questo scenario, sistema 6 di controllo del robot manipolatore 5 (o più specificamente l'unità 17 di interpolazione della traiettoria) trasformerà la posizione X_{ref} di riferimento dello spazio cartesiano in angoli q_{ref} di riferimento dello spazio articolare e passerà questi riferimenti ad un controllore di posizione di basso livello, che funziona indipendentemente su ciascun giunto. Come indicato nella Figura 3, è incluso un blocco SA di anti-singolarità per impedire al robot 5 di raggiungere una configurazione singolare in cui un errore sarebbe sicuramente generato dall'unità 17 di interpolazione (a causa della singolarità della matrice Jacobiana) o da un relativo controllore di sicurezza (a causa di una violazione dei limiti di velocità di almeno un giunto).

Alcuni aspetti del funzionamento dell'impianto 1 verranno spiegati in maggiore dettaglio con riferimento ad un secondo aspetto della presente invenzione qui sotto descritto.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, l'impianto 1 (in particolare, il dispositivo robotizzato 3)

è configurato per implementare il metodo di cui al secondo aspetto della presente invenzione.

In accordo con il secondo aspetto della presente invenzione viene fornito un metodo per il controllo di un sistema 3 robotizzato chiuso (si veda la definizione di sistema chiuso soprastante), il quale svolge le stesse funzioni e comprende gli stessi componenti del dispositivo robotizzato 3 descritto nell'ambito del primo aspetto della presente invenzione. Più precisamente, il dispositivo robotizzato 3 è come quello descritto in accordo con il primo aspetto della presente invenzione. In particolare, il dispositivo robotizzato 3 è parte dell'impianto 1 del primo aspetto della presente invenzione.

Il metodo comprende una fase di apprendimento, durante la quale l'operatore muove l'elemento terminale 4 del robot manipolatore 5 mediante il gruppo di comando 7 comprendente il sensore 10 di forza/coppia ed i movimenti seguiti dall'elemento terminale 4 vengono memorizzati nell'unità di memorizzazione 8; ed una fase di riproduzione, la quale è successiva alla fase di apprendimento e durante la quale il sistema di controllo 6 aziona il robot manipolatore 5 in modo che l'elemento terminale 4 ripeta sostanzialmente i movimenti memorizzati nell'unità di memorizzazione 8 (in particolare, eseguiti durante la fase di apprendimento). In particolare, durante la fase di apprendimento, l'operatore

afferra il dispositivo di manipolazione 9.

Durante la fase di apprendimento, l'operatore esercita una forza ed una coppia F_c sul dispositivo di manipolazione 9; il sensore 10 rileva la forza e la coppia F_{ext} applicate al dispositivo di manipolazione 9; ed il sistema di elaborazione 11 effettua un controllo AC di ammettenza ricavando, in funzione di quanto rilevato dal sensore 10, delle indicazioni di movimento per il robot manipolatore 5 nello spazio cartesiano. In particolare, il sistema di elaborazione 11, a seguito del controllo AC di ammettenza, fornisce le indicazioni X_{ref} di movimento nello spazio cartesiano ad una unità 17 di interpolazione di traiettorie del sistema robotizzato 3 in modo da generare una traiettoria desiderata tramite interpolazione. In tal modo, è possibile utilizzare funzioni presenti anche nei sistemi chiusi, senza dover necessariamente forzare e sovrascrivere le posizioni e/o velocità dei giunti nello spazio dei giunti a seguito di una cinematica inversa (come invece avviene solitamente nelle soluzioni di arte nota relative a metodi di autoapprendimento).

Alcuni studi dimostrano che gli input intenzionali esercitati dall'uomo presentano una frequenza dominante nella fascia da 0 a 5 Hz, mentre gli urti accidentali sono solitamente rappresentati da picchi ad alte frequenze (maggiori di 10 Hz). Preferibilmente, la frequenza

dell'interpolazione di traiettoria è pari o superiore a 125 Hz, in particolare pari o superiore a 250 Hz. In tal modo è possibile aumentare la velocità di movimentazione del robot manipolatore 5 durante la fase di apprendimento in virtù di una latenza estremamente minore rispetto a quelle che sono le frequenze per urti accidentali.

Vantaggiosamente ma non necessariamente, il metodo comprendente le ulteriori fasi di creare un sistema di riferimento target dinamico (DTRF - la quale è una funzione solitamente disponibile anche nei sistemi chiusi) per il robot manipolatore 5; e impostare come posizione di riferimento iniziale del sistema di riferimento target dinamico (DTRF) la posizione dell'elemento terminale 4.

In particolare, il metodo comprende l'ulteriore fase di sincronizzare la posizione dell'elemento terminale 4 con quella del sistema di riferimento target dinamico (DTRF).

Preferibilmente, inoltre, il metodo comprende l'ulteriore fase di modificare la posizione del sistema di riferimento target dinamico (DTRF) in funzione delle indicazioni X_{ref} di movimento elaborate durante il controllo AC di ammettenza.

In alcuni casi non limitativi, l'unità 17 di interpolazione del sistema robotizzato 3 converte le indicazioni X_{ref} di movimento nello spazio cartesiano in indicazioni di movimento q_{ref} nello spazio dei giunti.

Vantaggiosamente ma non necessariamente, il metodo comprendente l'ulteriore fase di, a seguito del controllo AC di ammettenza, ma prima dell'interpolazione effettuata dall'unità 17, effettuare un controllo SA di singolarità sulle indicazioni X_{ref} di movimento nello spazio cartesiano in modo da evitare comportamenti indesiderati e/o potenzialmente pericolosi del robot manipolatore 5, determinando delle indicazioni X^*_{ref} anti-singolarità.

Nella non limitativa forma di attuazione della figura 3, il metodo comprende l'ulteriore fase di variare il controllo SA delle singolarità in funzione di una famiglia CF cinematica di cui fa parte il robot manipolatore 5.

In alcuni casi non limitativi, la famiglia CF cinematica è selezionata dall'operatore prima di effettuare la fase di apprendimento.

Vantaggiosamente ma non necessariamente, durante la fase di apprendimento, il sistema di elaborazione 11 stima una forza ed una coppia F_{nc} di non contatto in funzione di componenti fisse e variabili date dal carico (in particolare, del dispositivo di manipolazione) di quanto montato sul (più precisamente, supportato dal) sensore 10 (più precisamente, ad una parte sensibile del sensore 10) ed ottiene la forza e la coppia F^*_c stimate (applicate dall'operatore sul dispositivo di manipolazione 9) in funzione della forza e coppia F_{ext} rilevate e della forza e coppia F_{nc} di non contatto

stimate. In questi casi, il sistema di elaborazione 11 fornisce indicazioni X_{ref} di movimento per il robot manipolatore 5 in funzione della forza e coppia F^*_c stimate e fornite dal sistema di elaborazione 11. In particolare, la forza e la coppia F^*_c vengono stimate sottraendo la forza e la coppia di non contatto F_{nc} dalla forza e coppia F_{ext} rilevate.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, le componenti fisse e variabili date dal carico comprendono la gravità e forze inerziali e di Coriolis. In particolare, le componenti variabili vengono stimate in funzione della velocità angolare ω , dell'accelerazione angolare α , dell'accelerazione lineare a e dell'inerzia (tensore d'inerzia) di quanto montato sul (più precisamente, supportato dal) sensore 10 (più precisamente, su una parte sensibile del sensore 10).

Durante l'interazione uomo-robot è necessario garantire la stabilità per rendere il sistema sicuro e minimizzare lo sforzo fisico dell'operatore. A tal fine viene utilizzato il controllo di ammettenza e la scelta dei relativi parametri è di massima importanza. Quanto qui proposto permette di identificare le deviazioni dal comportamento nominale di un robot controllato in ammettenza, adattando i parametri del controllore in modo tale da garantirne la passività.

La scelta dei parametri influenza il modo con cui il

robot interagisce con l'operatore. Ad esempio, se l'operazione richiede movimenti fini, l'inerzia e lo smorzamento avranno valori alti per rendere il robot meno reattivo e ottenere un movimento più fluido. Al contrario, se l'operazione richiede alte velocità e accelerazioni, i parametri avranno valori più bassi. Inoltre, anche la rigidità che l'operatore esercita durante l'interazione con il robot influenza il comportamento del sistema. In particolare, più l'operatore è rigido, più il sistema si allontana dal comportamento ideale definito dall'equazione (B), vibrando e rendendo difficoltosa e non sicura l'interazione. Per questo motivo le deviazioni dal comportamento ideale devono prima essere identificate e successivamente cancellate (o ridotte), ripristinando la stabilità del sistema.

Preferibilmente, nell'unità di adattamento parametri PA del controllo AC di ammettenza, i parametri del controllo di ammettenza sono regolati online, ovvero durante l'interazione tra l'operatore e il robot. Inizialmente viene definita un'euristica per riconoscere le deviazioni del robot dal comportamento nominale; successivamente viene presentato un metodo per l'adattamento dei parametri che garantisce il ripristino delle condizioni nominali, senza aumentare eccessivamente lo sforzo fisico dell'operatore. La passività e quindi la stabilità del robot controllato in

ammettenza viene garantita. Viene proposta una soluzione meno conservativa che prevede l'utilizzo di serbatoi virtuali di energia, che immagazzinano l'energia dissipata dal sistema per poterla riutilizzare in seguito.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, i parametri di inerzia e smorzamento vengono variati (adattati) quando la seguente disuguaglianza non è verificata:

$$\psi(\dot{x}, \ddot{x}, F_s) = \|F_s - M_d \ddot{x} - D_d \dot{x}\| \leq \varepsilon \quad (14)$$

in cui $\varepsilon > 0$ è una soglia minima ricavata sperimentalmente. Come già sopra indicato, M_d e D_d sono la matrice di inerzia e di smorzamento desiderate, $\dot{x}$ è la velocità cartesiana e $\ddot{x}$ è l'accelerazione cartesiana.

Considerando il comportamento dinamico del controllo di ammettenza, viene definito con "comportamento nominale" il comportamento del robot quando è valida la disuguaglianza (14).

Utilizzando questa equazione è possibile definire un'euristica per l'identificazione della deviazione dal comportamento nominale, riscontrabile quando, ad esempio, l'operatore irrigidisce il proprio braccio durante l'interazione con il robot.

Una volta identificata questa deviazione occorre adattare i parametri del controllo di ammettenza. Attraverso l'utilizzo dei serbatoi di energia è possibile definire

l'incremento di inerzia necessario per riportare il sistema nelle condizioni nominali, garantendone la passività.

Vantaggiosamente ma non necessariamente (durante la fase di apprendimento), il controllo di ammettenza (del sistema di controllo 16) viene variato (adattato) in funzione della forza e della coppia rilevate F_s . In particolare, vengono variati (adattati) i parametri del controllo di ammettenza. Più in particolare, vengono variati (adattati) i parametri di inerzia e smorzamento del controllo di ammettenza.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, il controllo di ammettenza (del sistema di controllo 16) viene variato (adattato) modificando (adattando) i parametri del controllo di ammettenza. Più in particolare, vengono variati (adattati) i parametri di inerzia e smorzamento del controllo di ammettenza.

Secondo alcune forme di attuazione non limitative, lo smorzamento viene variato in modo da mantenere il rapporto tra inerzia e smorzamento sostanzialmente costante. Questo permette di mantenere la dinamica del sistema simile a quella precedente alla variazione, il che è più intuitivo per l'operatore.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, durante la fase di apprendimento, l'operatore regola nel tempo almeno un parametro di funzionamento dell'elemento

terminale 4 ed il parametro di funzionamento applicato (e la sua variazione nel tempo) viene sostanzialmente memorizzato dall'unità di memorizzazione 8. In questi casi, durante la fase di riproduzione, il sistema di controllo 6 regola l'azionamento della testa di spruzzo 4 in modo che il parametro di funzionamento memorizzato durante la fase di apprendimento (e la sua variazione nel tempo) venga sostanzialmente ripetuto. Vantaggiosamente ma non necessariamente, durante la fase di riproduzione, il sistema di controllo 6 regola l'azionamento dell'elemento terminale 4 in modo che il parametro di funzionamento memorizzato durante la fase di apprendimento (e la sua variazione nel tempo) venga sostanzialmente ripetuto, in particolare in modo coordinato con i movimenti seguiti dall'elemento terminale 4.

Vantaggiosamente ma non necessariamente, il parametro di funzionamento è scelto secondo quanto sopra descritto.

Vantaggiosamente ma non necessariamente, durante la fase di apprendimento, l'operatore sposta il (in particolare, regola nel tempo l'orientazione del) manufatto 2 e la posizione così ottenuta (in particolare, l'orientazione ottenuta e la sua variazione nel tempo) viene memorizzata dall'unità di memorizzazione. In questi casi, durante la fase di riproduzione, il sistema di controllo 6 regola la posizione (l'orientazione) del manufatto 2 in modo

che la posizione (l'orientazione) del manufatto 2 memorizzata durante la fase di apprendimento (e la sua variazione nel tempo) venga sostanzialmente ripetuta, in particolare in modo coordinato con i movimenti seguiti dall'elemento terminale 4.

Secondo alcune forme d'attuazione non limitative, durante la fase di apprendimento, il gruppo di comando 7 fornisce indicazioni di movimento al sistema di controllo 6, il quale sua volta aziona il robot manipolatore 5 in funzione delle indicazioni ricevute dal gruppo di comando 7.

Vantaggiosamente ma non necessariamente, il dispositivo di manipolazione 9 comprende almeno una impugnatura 12, la quale, durante la fase di apprendimento, viene afferrata dall'operatore per muovere la testa di spruzzo 4.

In particolare, il dispositivo di manipolazione 9 comprende almeno due impugnature 12, le quali, durante la fase di apprendimento, vengono afferrate dall'operatore per muovere la testa di spruzzo 4 e sono tra loro collegate in modo solidale, in particolare mediante un elemento di collegamento del dispositivo di manipolazione.

Secondo alcune forme d'attuazione il manufatto 2 è un manufatto ceramico, in particolare un manufatto sanitario come ad esempio un lavabo e/o un lavello e/o consolle e/o piatto doccia.

Secondo un ulteriore aspetto della presente invenzione,

viene fornito un kit per la programmazione di un controllo di un sistema robotizzato chiuso già esistente. Il kit comprendente:

- il gruppo di comando 7 installabile (e rimovibile) su un robot manipolatore 5 e comprende il dispositivo di manipolazione, sul quale, in uso, l'operatore esercita la forza e la coppia F_c di contatto;

- il sensore 10, il quale è collegabile (e rimovibile) all'elemento terminale 4 del sistema robotizzato 3 ed è atto a rilevare la forza e la coppia F_{ext} applicate al dispositivo di manipolazione 9; ed

- il sistema di elaborazione 11, il quale è atto a fornire indicazioni di movimento cartesiane per il robot manipolatore 5 in funzione di quanto rilevato dal sensore 10 e a seguito di un controllo di ammettenza. In particolare, il kit è configurato per essere installato su un sistema robotizzato 3 chiuso già esistente e svolgere il metodo precedentemente descritto.

Benché l'invenzione sopra descritta faccia particolare riferimento ad un esempio di attuazione ben preciso, essa non è da ritenersi limitata a tale esempio di attuazione, rientrando nel suo ambito tutte quelle varianti, modifiche o semplificazioni coperte dalle rivendicazioni allegate, quali ad esempio una diversa geometria del robot manipolatore 5, un diverso tipo di elemento terminale, una diversa

suddivisione delle fasi del metodo, ecc.

L'impianto ed il metodo sopra descritti comportano numerosi vantaggi.

Innanzitutto, tale l'architettura garantisce che il robot manipolatore 5 segua la traiettoria imposta dall'operatore umano (attraverso il sensore di forza/coppia e il controllo di ammettenza) sfruttando solo le funzionalità di un sistema di controllo standard (chiuso) e senza la necessità di un'interfaccia controller obbligatoriamente aperta.

Inoltre, in tal modo, è possibile raggiungere velocità elevate durante la fase di insegnamento, garantendo al contempo la stabilità del sistema e la sicurezza dell'operatore umano. È così possibile aiutare le imprese a raggiungere una maggiore flessibilità produttiva per far fronte a prodotti in rapida evoluzione.

Infine, è possibile realizzare una semplice integrazione di un sistema robotizzato chiuso generico utilizzando il kit sopra indicato.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo per il controllo di un sistema robotizzato (3) chiuso; il metodo comprendente:

- una fase di apprendimento, durante la quale un operatore muove un elemento terminale (4) di un robot manipolatore del sistema robotizzato (3) mediante il gruppo di comando (7) comprendente un sensore (10) di forza/coppia ed i movimenti seguiti dall'elemento terminale (4) vengono memorizzati in una unità di memorizzazione (8) del sistema robotizzato (3);

- una fase di riproduzione, la quale è successiva alla fase di apprendimento e durante la quale un sistema di controllo (6) aziona il robot manipolatore in modo che l'elemento terminale (4) ripeta sostanzialmente i movimenti memorizzati nell'unità di memorizzazione (8);

il metodo essendo **caratterizzato dal fatto che**, durante la fase di apprendimento, l'operatore esercita una forza e/o una coppia (F_c) sul gruppo di comando (7), il cui sensore (10) rileva una forza e/o una coppia (F_{ext}) applicate; ed in cui un sistema di elaborazione (11) effettua un controllo di ammettenza ricavando, in funzione di quanto rilevato dal sensore (10), delle indicazioni di movimento (X_{ref} , X^*_{ref}) per il robot manipolatore nello spazio cartesiano;

il sistema di elaborazione (11), a seguito del controllo di ammettenza, fornisce le indicazioni di movimento (X_{ref} ,

X^*_{ref}) nello spazio cartesiano ad una unità di interpolazione di traiettorie del sistema robotizzato (3) in modo da generare una traiettoria desiderata tramite interpolazione.

2. Metodo secondo la rivendicazione 1, e comprendente le ulteriori fasi di creare un sistema di riferimento target dinamico (DTRF) per il robot manipolatore; e impostare come posizione di riferimento iniziale del sistema di riferimento target dinamico (DTRF) la posizione dell'elemento terminale (4).

3. Metodo secondo la rivendicazione 2, e comprendente l'ulteriore fase di sincronizzare la posizione dell'elemento terminale (4) con quella del sistema di riferimento target dinamico (DTRF).

4. Metodo, secondo una qualunque delle rivendicazioni 2 o 3 e comprendente l'ulteriore fase di modificare la posizione del sistema di riferimento target dinamico (DTRF) in funzione delle indicazioni di movimento (X_{ref} , X^*_{ref}) elaborate durante il controllo di ammettenza.

5. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti in cui l'unità di interpolazione del sistema robotizzato (3) converte le indicazioni di movimento (X_{ref} , X^*_{ref}) nello spazio cartesiano in indicazioni di movimento (q_{ref}) nello spazio dei giunti.

6. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, e comprendente l'ulteriore fase di, a seguito

del controllo di ammettenza, ma prima dell'interpolazione, effettuare un controllo di singolarità sulle indicazioni di movimento (X_{ref} , X^*_{ref}) nello spazio cartesiano in modo da evitare comportamenti indesiderati e/o potenzialmente pericolosi del robot manipolatore.

7. Metodo secondo la rivendicazione 6 e comprendente l'ulteriore fase di variare il controllo delle singolarità in funzione di una famiglia cinematica di cui fa parte il robot manipolatore.

8. Metodo secondo la rivendicazione 7, in cui la famiglia cinematica è selezionata dall'operatore prima di effettuare la fase di apprendimento.

9. Metodo secondo una qualunque delle rivendicazioni precedenti, in cui durante la fase di apprendimento, il sistema di elaborazione (11) stima una forza ed una coppia (F_{nc}) di non contatto in funzione di componenti fisse e variabili date dal carico (in particolare, del dispositivo di manipolazione (9)) di quanto montato sul sensore (10) ed ottiene una forza ed una coppia (F^*_c) stimate (in particolare, applicate dall'operatore sul dispositivo di manipolazione (9)) in funzione della forza e coppia (F_s) rilevate e della forza e coppia di (F_{nc}) non contatto stimate; il sistema di elaborazione (11) fornisce indicazioni di movimento (X_{ref} , X^*_{ref}) per il robot manipolatore in funzione della forza e coppia (F^*_c) stimate e fornite dal sistema di

elaborazione (11) (11); in particolare, la forza e la coppia (F^*_c) stimate vengono stimate sottraendo la forza e la coppia (F_c) di non contatto dalla forza misurata (F_{ext}).

10. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui il sistema di elaborazione (11) (11) comprende un'unità di elaborazione (14) (14), e l'unità di elaborazione (14) (14) comprende, in particolare è, un filtro di Kalman.

11. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui, durante la fase di apprendimento, il controllo di ammettenza viene variato in funzione della forza e della coppia rilevate (F_s); in particolare, vengono variati i parametri di inerzia e smorzamento del controllo di ammettenza in funzione della forza e della coppia rilevate (F_s).

12. Metodo secondo la rivendicazione 11, in cui il controllo di ammettenza viene variato on line, durante il movimento dell'elemento terminale (4) da parte dell'operatore.

13. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui il gruppo di comando (7) comprende dei comandi, i quali sono azionati dall'operatore per regolare nel tempo almeno un parametro di funzionamento dell'elemento terminale (4); in cui l'unità di memorizzazione (8) (8) memorizza la regolazione del parametro di funzionamento; e

in cui il sistema di controllo (6) regola l'azionamento dello strumento in modo che la regolazione del parametro di funzionamento venga sostanzialmente ripetuta in modo coordinato con i movimenti eseguiti dal robot manipolatore.

14. Impianto (1) di lavorazione tramite un sistema robotizzato (3) chiuso; l'impianto (1) comprendente:

un sistema robotizzato (3), il quale, a sua volta, comprende un elemento terminale (4) (end effector), il quale è configurato per effettuare una lavorazione o interagire con un articolo in produzione;

un robot manipolatore, il quale è mobile con almeno tre gradi di libertà e sul quale è montato l'elemento terminale (4);

un sistema di controllo (6), il quale comprende un'unità di memorizzazione (8) ed è configurato per comandare il movimento del robot manipolatore in modo da muovere l'elemento terminale (4) nello spazio; un gruppo di comando (7), il quale è configurato per essere operato da un operatore per trasferire indicazioni di movimento (X_{ref} , X^*_{ref}) al robot manipolatore;

il gruppo di comando (7) comprende un dispositivo di manipolazione (9), sul quale, in uso, l'operatore esercita una forza ed una coppia (F_c); un sensore (10), il quale è collegato all'elemento terminale (4) ed è atto a rilevare una forza ed una coppia (F_s) applicate al dispositivo di

manipolazione (9) (9); ed un sistema di elaborazione (11) (11), il quale è atto a fornire indicazioni di movimento (X_{ref} , X^*_{ref}) cartesiane per il robot manipolatore (5) in funzione di quanto rilevato dal sensore (10) (10) e a seguito di un controllo di ammettenza;

l'unità di memorizzazione (8) è atta a memorizzare i movimenti seguiti dal robot manipolatore mentre l'elemento terminale (4) viene mosso dall'operatore mediante il gruppo di comando (7); il sistema di controllo (6) è atto a comandare il movimento dell'elemento terminale (4) in funzione dei movimenti memorizzati dall'unità di memorizzazione (8);

l'impianto (1) essendo configurato in modo da svolgere il metodo secondo una qualunque delle rivendicazioni precedenti.

15. Impianto (1) secondo la rivendicazione 14, e comprendente una testa di spruzzo, configurata per emettere un getto di una sostanza per la copertura di almeno una parte della superficie di un manufatto (2) ceramico.

16. Kit per la programmazione di un controllo di un sistema robotizzato (3) chiuso comprendente:

- un gruppo di comando (7) installabile su un robot manipolatore e comprende un dispositivo di manipolazione (9), sul quale, in uso, l'operatore esercita una forza ed una coppia (F_c);

- un sensore (10), il quale è collegabile ad un elemento terminale (4) del sistema robotizzato (3) ed è atto a rilevare una forza ed una coppia (F_{ext}) applicate al dispositivo di manipolazione (9) (9); ed

- un sistema di elaborazione (11) (11), il quale è atto a fornire indicazioni di movimento (X_{ref} , X^*_{ref}) cartesiane per il robot manipolatore (5) in funzione di quanto rilevato dal sensore (10) (10) e a seguito di un controllo di ammettenza;

il kit essendo configurato per essere installato su un sistema robotizzato (3) chiuso e svolgere il metodo in accordo con le rivendicazioni da 1 a 13.

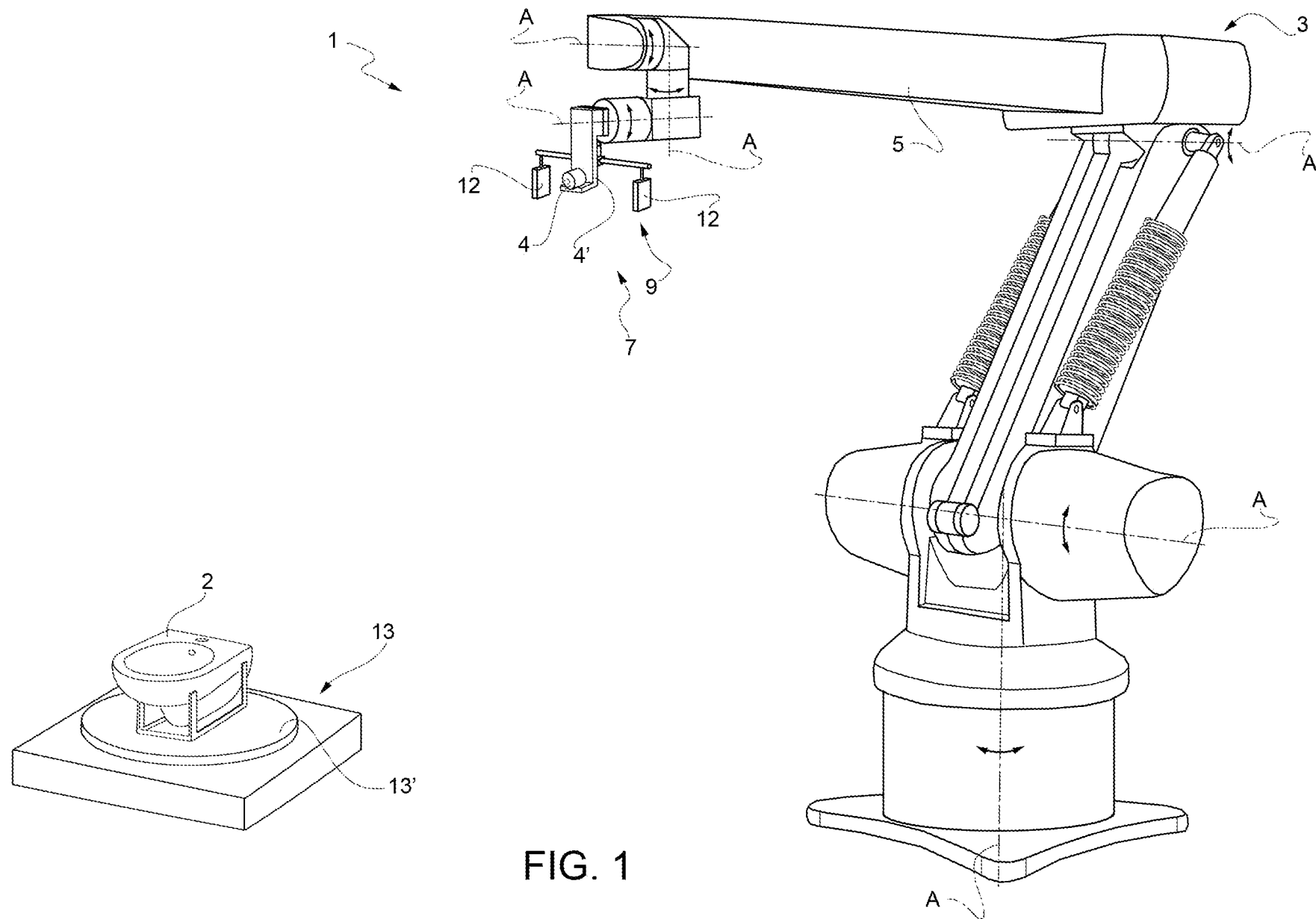


FIG. 2

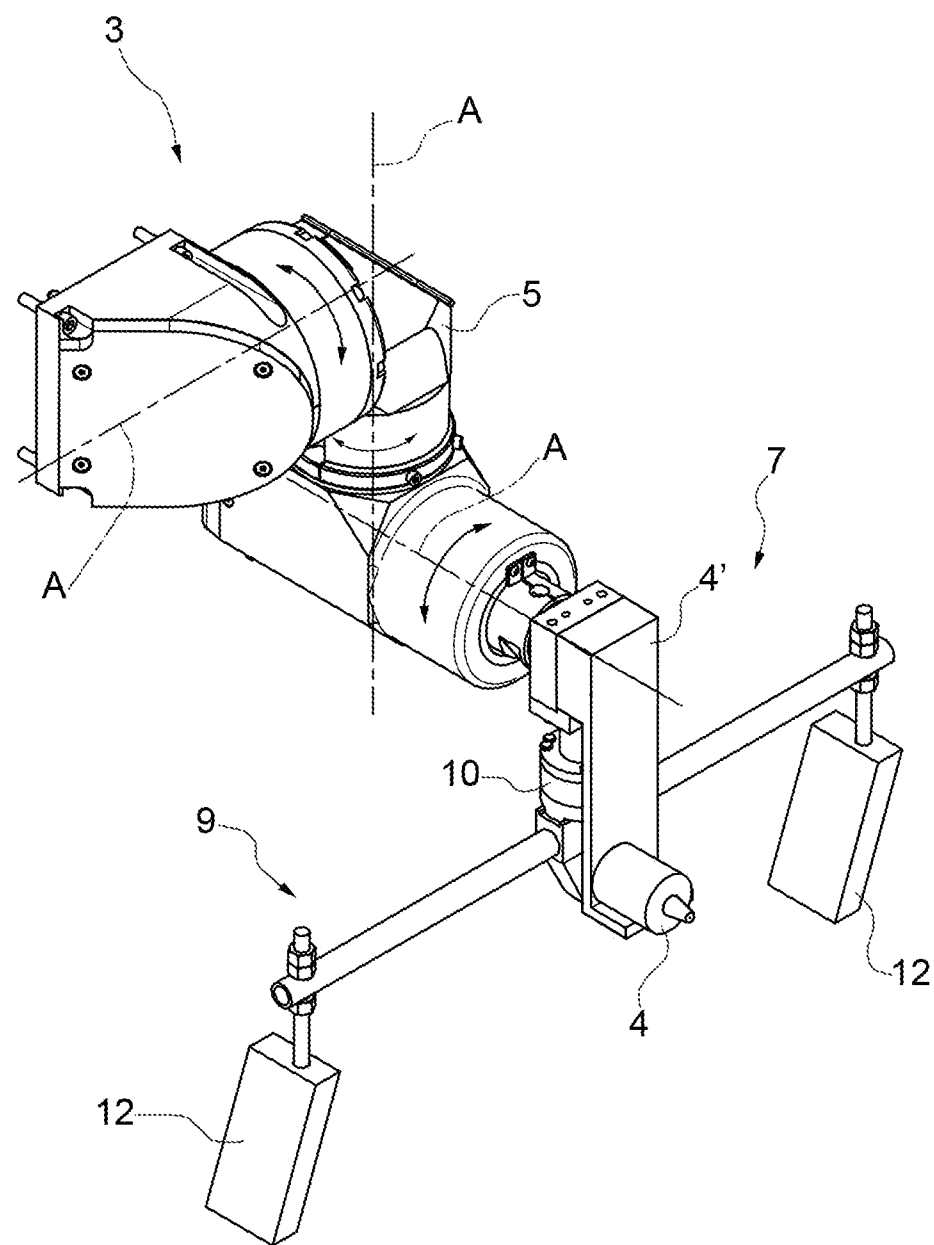


FIG. 3

