



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA NUMERO	102006901416704
Data Deposito	23/05/2006
Data Pubblicazione	23/11/2007

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
F	03	D		

Titolo

SISTEMA E PROCEDIMENTO DI CONTROLLO AUTOMATICO DEL VOLO DI PROFILI ALARI DI POTENZA.
--

Descrizione dell'Invenzione Industriale avente per
titolo:

"SISTEMA E PROCEDIMENTO DI CONTROLLO AUTOMATICO DEL
VOLO DI PROFILI ALARI DI POTENZA"

a nome:

- MODELWAY S.R.L., di nazionalità italiana, con
sede in Via Boggio 61 - 10138 TORINO; e
- SEQUOIA AUTOMATION S.R.L., di nazionalità
italiana, con sede in Via XXV Aprile 8 - 10023
CHIERI (TO).

Depositata il **23 MAG. 2006** al n. **TO 2006 A 000372**

DESCRIZIONE

La presente invenzione si riferisce ad un
sistema e ad un procedimento di controllo
automatico del volo di profili alari di potenza, in
particolare per l'ottimizzazione della conversione
di energia eolica in energia elettrica o meccanica
attraverso il volo di profili alari di potenza
collegati mediante cavi a dispositivi di
conversione a terra.

Sono noti infatti, da alcuni brevetti
anteriori, processi di conversione dell'energia
eolica in energia elettrica o meccanica mediante
dispositivi in grado di convertire l'energia
meccanica generata dalla fonte eolica in altra

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)

By

forma di energia, tipicamente energia elettrica, che sottraggono l'energia eolica al vento utilizzando profili alari di potenza (genericamente indicati con il termine inglese "kite") ad essi connessi mediante cavi. In particolare, la domanda di brevetto italiana n. TO2003A000945 e la domanda di brevetto europeo EP 04028646.0 che ne rivendica la priorità a nome Ippolito Massimo descrivono un sistema per convertire l'energia cinetica di correnti eoliche in energia elettrica mediante il controllo del volo di profili alari di potenza connessi ad un sistema di tipo "a giostra". In tale sistema sarebbe auspicabile l'utilizzo di un sistema e di un procedimento di controllo automatico del volo dei profili alari di potenza utilizzati che permetta di manovrare in tempo reale i profili alari stessi secondo le modalità descritte nei suddetti brevetti. Allo stato attuale della tecnica però non sono noti sistemi che permettano il controllo del volo dei profili alari utilizzati nel sistema di tipo "a giostra" in modo efficiente.

Sono altresì noti sistemi per convertire l'energia cinetica di correnti eoliche in energia elettrica, nei quali almeno un profilo alare è

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

69

connesso mediante cavi ad un'unità di manovra e generazione di energia fissa a terra: in tali sistemi, il profilo è portato ciclicamente attraverso una fase di trazione nella quale ascende spinto dal vento, e durante la quale lo svolgimento dei cavi porta in rotazione un generatore dell'unità a terra atto alla generazione di energia elettrica, ed una fase di recupero nella quale il profilo è recuperato e successivamente manovrato in modo da catturare nuovamente il vento. Anche in questi casi, la tecnica non propone sistemi che permettano, in modo efficiente, il controllo del volo del profilo alare in modo tale da garantire l'ottimizzazione della produzione di energia elettrica, ed in particolare da massimizzare l'energia meccanica trasmessa a terra tramite i cavi.

In passato sono state anche proposte diverse soluzioni relative al traino di imbarcazioni per mezzo di dispositivi che catturano le correnti eoliche tramite profili alari di potenza, come quelle in particolare descritte nel brevetto inglese n. GB 2.098.951, nel brevetto statunitense n. US 5.056.447, nel brevetto statunitense n. US 5.435.259, nel brevetto internazionale n.

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



WO03097448, nella domanda di brevetto statunitense n. US2004035345, nella domanda di brevetto statunitense n. US2004200396, nel brevetto internazionale n. WO2005100147, nel brevetto internazionale n. WO2005100148, nel brevetto internazionale n. WO2005100149, nella domanda di brevetto tedesco n. DE102004018814

Anche in questi casi comunque, allo stato attuale della tecnica non sono noti sistemi e/o procedimenti che permettano il controllo del volo dei profili alari utilizzati per propulsione navale in modo efficiente.

In ogni caso comunque, l'implementazione a bordo dei sistemi di conversione sopra citati dei classici algoritmi di controllo predittivo basati su modelli della dinamica di volo dei profili alari per fornire un controllo automatico del volo dei profili stessi, richiederebbe una complessità ed una pesantezza computazionale che mal si concilia con le esigenze di utilizzare elaboratori di calcolo snelli, con costi accettabili e di fornire istruzioni di comando in tempo reale.

Scopo quindi della presente invenzione è quello di risolvere i suddetti problemi della tecnica anteriore fornendo un sistema ed un

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



procedimento di controllo automatico del volo di profili alari di potenza che permettano, in modo efficiente, di ottimizzare la conversione di energia eolica in energia elettrica o meccanica e/o di massimizzare l'energia trasmessa a terra dai profili stessi attraverso i cavi.

Un altro scopo della presente invenzione è quello di fornire un procedimento di controllo automatico del volo di profili alari di potenza che permetta l'implementazione efficiente e computazionalmente compatibile con l'esigenza di un controllo in tempo reale, di algoritmi di controllo predittivo basati su un modello della dinamica di volo dei profili stessi.

I suddetti ed altri scopi e vantaggi dell'invenzione, quali risulteranno dal seguito della descrizione, vengono raggiunti con un sistema di controllo automatico del volo di profili alari di potenza come quello descritto nella rivendicazione 1.

Inoltre, i suddetti ed altri scopi e vantaggi dell'invenzione vengono raggiunti con un procedimento di controllo automatico del volo di profili alari di potenza come quello descritto nella rivendicazione 16.

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)

88

Forme di realizzazione preferite e varianti non banali della presente invenzione formano l'oggetto delle rivendicazioni dipendenti.

La presente invenzione verrà meglio descritta da alcune forme preferite di realizzazione, fornite a titolo esemplificativo e non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- la FIG. 1 mostra un diagramma a blocchi rappresentante i componenti principali del sistema di controllo automatico del volo di profili alari di potenza secondo la presente invenzione;
- la FIG. 2 mostra una vista dall'alto del sistema "a giostra" noto in alcune fasi di volo di un profilo alare; e
- la FIG. 3 mostra uno schema illustrante un sistema di riferimento in coordinate sferiche relativo ad un profilo alare di potenza vincolato ad un'unità di attuazione in movimento lungo una traiettoria assegnata.

Nel prosieguo della descrizione, si ipotizzerà che il volo di almeno un profilo alare di potenza 2 sia manovrato da almeno un'unità di manovra 4 dotata di organi alterno-motorizzati ai quali il profilo stesso è collegato mediante cavi di manovra 6, come quella sostanzialmente descritta nella

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



domanda di brevetto italiana n. TO2003A000945 e nella domanda di brevetto europeo EP 04028646.0. Di conseguenza, per ovvie questioni di brevità, per una descrizione dettagliata dei componenti che verranno nel seguito citati e comuni con il sistema di tipo "a giostra", si rimanda al testo dei suddetti brevetti. È comunque del tutto evidente, così come emergerà chiaramente dalla descrizione che seguirà, che il sistema ed il procedimento secondo la presente invenzione possano essere utilizzati anche per altre applicazioni, differenti del sistema di tipo "a giostra", apportando modifiche comunque alla portata di un qualsiasi esperto del settore.

Facendo riferimento quindi alla FIG. 1 è possibile notare che il sistema 1 di controllo automatico del volo di almeno un profilo alare di potenza 2 secondo la presente invenzione comprende:

- primi mezzi di rilevamento 3 a bordo del profilo alare di potenza 2 atti a rilevare prime informazioni riguardanti almeno la posizione e l'orientamento nello spazio del profilo 2 stesso e le accelerazioni triassiali alle quali è sottoposto;
- secondi mezzi di rilevamento 5 a terra atti a

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



rilevare seconde informazioni riguardanti almeno l'entità della tensione sui cavi di manovra del profilo alare 2 e la loro posizione relativa, la direzione e l'intensità di una corrente eolica W all'interno della quale è immerso il profilo alare 2, ed eventualmente la posizione e gli spostamenti dell'unità di manovra 4 lungo una sua traiettoria di movimento;

- mezzi di elaborazione e controllo 7 delle prime e delle seconde informazioni, atti a trasformare il contenuto di tali informazioni in un comando meccanico agente sugli organi dell'unità di manovra 4 per manovrare il profilo alare 2 lungo una traiettoria di volo che massimizzi la quantità di energia cinetica sottratta alla corrente eolica W stessa. In generale, i mezzi di elaborazione e controllo 7 ricevono in ingresso i segnali prodotti dai primi 3 e secondi 5 mezzi di rilevamento che rilevano rispettivamente le prime e seconde informazioni rappresentanti sostanzialmente i vari parametri P caratterizzanti le condizioni di funzionamento del "sistema di dinamica del volo dei profili alari" e delle condizioni del vento e realizzano una funzione di controllo U del profilo alare 2 che viene trasformato nel comando meccanico

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



da trasmettere all'unità di manovra 4. Nel seguito, tale funzione U sarà supposta esplicitarsi in via principale attraverso il controllo differenziale della posizione dei cavi 6 che controllano il profilo alare 2. In ogni caso, gli specifici dettagli realizzativi di attuazione del controllo non sono di per se determinanti per la soluzione qui descritta. Gli esperti del settore comprenderanno che tale compito elaborativo può essere agevolmente svolto, nell'ambito dei mezzi di elaborazione e controllo 7, tanto da un processore dedicato (di qualunque tipo noto), quanto con un processore di tipo general-purpose programmato (secondo criteri di per se noti) con un corrispondente prodotto informatico;

- un sistema di trasmissione delle prime informazioni ai mezzi di elaborazione e controllo 7.

Preferibilmente, per dedurre la posizione e l'orientamento del profilo alare 2 nello spazio e le accelerazioni alle quali è sottoposto, i primi mezzi di rilevamento 3 comprendono degli accelerometri triassiali di tipo MEMS in combinazione con almeno una bussola elettronica, quest'ultima realizzata, per esempio, con un

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



magnetometro, di tipo Fluxgate o di altro tipo. In particolare, il profilo alare 2 è equipaggiato con almeno un magnetometro ed almeno due accelerometri triassiali collocati alle estremità del profilo alare 2 stesso, preferibilmente in corrispondenza dell'unione con i cavi di manovra 6.

Come detto, i secondi mezzi di rilevamento 5 sono, tra l'altro, atti a rilevare le seconde informazioni 5a riguardanti almeno l'entità della tensione sui cavi di manovra 6 del profilo alare 2 e la loro posizione relativa, reale od emulata dagli organi dell'unità di manovra 4. I secondi mezzi di rilevamento 5 possono quindi comprendere "strain gauges" per misurare la deflessione dei cavi di manovra ed encoder sugli organi dell'unità di manovra; tali encoder, eventualmente associati ad un alternomotore, possono anche essere utilizzati per rilevare la lunghezza di cavo di manovra 6 svolto dagli organi, e di conseguenza la distanza del profilo alare 2 dall'unità di manovra 4, e la lunghezza differenziale tra i due cavi di manovra 6 di uno stesso profilo alare 2. Inoltre, i secondi mezzi di rilevamento 5 comprendono almeno un anemometro ed almeno un anemoscopio atti a rilevare, rispettivamente, intensità e direzione

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

PG

della corrente eolica W.

Inoltre, i secondi mezzi di rilevamento 5 possono anche comprendere il sistema di visione artificiale a terra, ottico o a microonde, della posizione del profilo alare.

Il sistema di trasmissione delle prime informazioni tra il profilo alare 2 ed i mezzi di elaborazione e controllo 7 può essere ovviamente realizzato con diverse tecnologie, come per esempio mediante fibre ottiche, trasmissione wireless, ecc...

Come detto nel preambolo della descrizione, il sistema ed il procedimento secondo la presente invenzione possono essere vantaggiosamente applicati alle due modalità differenti di conversione dell'energia eolica noti.

In una prima modalità, l'unità di manovra è fissa rispetto al terreno. La generazione di energia avviene quindi tramite la periodica attuazione di cicli composti di due fasi principali, indicati come fasi di trazione e di recupero. L'unità di manovra avvolge e rilascia i cavi tramite gli argani azionati da due attuatori elettrici, comandati dai mezzi di elaborazione e controllo, che possono agire sia come motori che

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



come generatori. Nella fase di trazione, il controllo è progettato in modo che il profilo alare, partendo da una assegnata lunghezza minima dei cavi, estende la loro lunghezza, così che gli attuatori elettrici vengano messi in rotazione tramite gli argani, generando energia elettrica. Quando i cavi raggiungono la loro massima lunghezza, inizia la fase di recupero, nella quale il profilo alare è condotto in una regione dalla quale i cavi possono essere recuperati dagli attuatori elettrici spendendo una piccola frazione dell'energia generata nella fase di trazione. Quando i cavi raggiungono la prescelta lunghezza minima, inizia nuovamente la fase di recupero. Il sistema secondo la presente invenzione permette di massimizzare l'energia generata nella fase di trazione e da minimizzare l'energia spesa per il recupero del profilo alare.

In una seconda modalità l'unità di manovra è in grado di muoversi rispetto al suolo lungo una traiettoria nota e l'energia è generata trasmettendo questo movimento ad un attuatore elettromeccanico. A titolo esemplificativo, si considera qui una traiettoria circolare, come quella realizzabile nella configurazione in cui i

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



profili alari sono utilizzati insieme al sistema "a
 giostra" 20. Il processo prevede la periodica
 attuazione di cicli composti da quattro fasi
 rappresentate graficamente nella FIG. 2 come fase I
 di trazione con mura a destra, fase II di
 sospensione trazione e cambio mura II, fase III di
 trazione con mura a sinistra, fase IV di cambio
 mura. Tali fasi sono individuate in relazione ad un
 angolo α che indica la posizione della unità di
 manovra 4 sul tracciato circolare, relativa alla
 direzione della corrente eolica W. Si assume che il
 moto della "giostra" 20 avvenga in senso orario e
 che gli angoli siano considerati positivi in questo
 senso. Si considera inoltre che il generatore
 elettrico mosso dalla "giostra" 20 sia controllato
 con un opportuno sistema di regolazione in modo
 tale che la velocità di rotazione $\dot{\alpha} = \dot{\alpha}^{ref}$ sia
 costante. La fase di trazione con mura a destra
 inizia per $\alpha = 0$ ed il sistema secondo la presente
 invenzione permette che il profilo alare 2 imprima
 una rotazione oraria alla "giostra" 20,
 massimizzando la potenza ottenibile nelle diverse
 posizioni della traiettoria. Questa fase termina
 per $\alpha = \bar{\alpha}$, angolo in cui il profilo alare 2 non è
 più in grado di fornire un momento positivo. Inizia

PAOLO GARAVELLI
 (15017 3100 771)



dunque la fase di sospensione trazione e cambio mura. Durante questa fase il profilo alare 2 non è in grado di produrre energia fino al successivo angolo $\alpha=\bar{\alpha}$ in cui inizia la fase di trazione con mura a sinistra. Pertanto il sistema secondo la presente invenzione conduce il profilo alare 2 in una regione nella quale offra la minima resistenza ed in prossimità dell'angolo $\alpha=\bar{\alpha}$ effettua il cambio di mura, per la transizione alla fase successiva di trazione con mura a sinistra. In questa fase il profilo 2 è di nuovo in grado di imprimere un momento positivo in senso orario alla "giostra" 20 ed il sistema secondo la presente invenzione permette di massimizzare la potenza ottenibile nelle diverse posizioni della traiettoria, fino ad $\alpha=0$. A questo punto si effettua la fase di cambio di mura a destra, minimizzando l'energia richiesta per tale operazione e il ciclo può ricominciare da una fase di trazione con mura a destra.

La presente invenzione si riferisce inoltre, ad procedimento di controllo automatico del volo di profili alari di potenza, in particolare destinato all'ottimizzazione della conversione di energia eolica in energia elettrica o meccanica mediante un

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

PG

sistema come quello precedentemente descritto utilizzando i parametri P caratterizzanti le condizioni di funzionamento del "sistema di dinamica del volo dei profili alari" e delle condizioni del vento e realizzando una funzione di controllo U del profilo alare. In particolare, il procedimento secondo la presente invenzione effettua il controllo del profilo alare utilizzando una metodologia di controllo predittivo MPC (Model Predictive Control) basato su un modello della dinamica di volo dei profili alari espresso in equazioni a tempo discreto, descritte, per assegnato periodo di campionamento Δt , come:

$$x_{t+1} = g(x_t, u_t, W_t, v_t^{ref})$$

$$F_t = h(x_t, u_t)$$

dove:

- W_t è un vettore della velocità del vento o della corrente eolica W i cui valori sono rilevati dai mezzi di rilevamento del sistema secondo la presente invenzione e trasmessi ai mezzi di elaborazione e controllo;
- v_t^{ref} è una funzione assegnata di progetto di cui in seguito;

PAOLO GARAVELLI
 (Iscriz. Albo n. 771)



- u_t è l'azione di controllo effettiva definita al tempo t dal procedimento secondo la presente invenzione;

- $x_t = [\vartheta, \phi, r, \Delta\vartheta, \Delta\phi, \Delta r, s, \Delta s]$ è un vettore di stato costituito, al tempo t , da posizioni e variazioni di posizioni del baricentro del profilo alare 2, espressi in coordinate sferiche, così come illustrato nella FIG. 3 per un sistema di riferimento solidale con l'unità di manovra 4, e da posizione e variazioni di posizione del unità di manovra 4 in coordinate curvilinee sulla traiettoria di movimento T considerata (supposta esemplificativamente come circolare) rilevate dai mezzi di rilevamento del sistema secondo la presente invenzione e trasmesse ai mezzi di elaborazione e controllo; e

- F_t è la forza utile trasmessa dai cavi per la generazione di energia.

Come già indicato, la generazione di energia prevede la periodica attuazione di cicli composti di fasi diverse. La generazione di energia avviene in alcune di queste fasi, durante le quali il compito del procedimento, agendo attraverso il sistema secondo la presente invenzione, è la massimizzazione dell'energia utile generata. Le

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



altri fasi servono per effettuare le transizioni da una fase utile all'altra e il compito del sistema e del procedimento secondo la presente invenzione è quello di effettuare tali transizioni minimizzando l'energia richiesta.

In ognuna di queste fasi il controllo viene calcolato con la tecnica MPC, che prevede di minimizzare a ogni tempo di campionamento un funzionale di costo J che definisce gli obiettivi del controllo per ogni singola fase. Tale minimizzazione deve essere inoltre soggetta a delle condizioni sulle variabili di controllo e di stato che definiscono i vincoli a cui queste variabili devono necessariamente soddisfare (ad esempio che la altezza da terra dei profili alari deve essere positiva o che la variabile di controllo e la sua velocità di variazione nel tempo non possono, per limitazioni fisiche, essere superiori ad assegnati valori).

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)

dy

Definendo l'orizzonte di predizione N_p e l'orizzonte di controllo $N_c \leq N_p$ il funzionale di costo J può essere espresso come:

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} L(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}, W_{t+k}, v_{t+k}^{ref})$$

dove:

$x_{t+k|t}$ indica lo stato predetto dal modello, data la sequenza di ingresso $u_{t|t}, \dots, u_{t+k-1|t}$ e lo stato "iniziale" $x_{t|t} = x_t$, $U = [u_{t|t}, u_{t+1|t}, \dots, u_{t+N_c-1|t}]^T$ è la sequenza di controllo da essere ottimizzata e L è una funzione opportunamente definita per rappresentare gli obiettivi di controllo della specifica fase in esame. Se $N_c < N_p$ viene fatta la scelta seguente:

$$u_{t+k|t} = u_{t+N_c-1|t}, k = N_c, N_c + 1, \dots, N_p - 1.$$

I vincoli sono espressi per ogni specifica fase operativa da disequazioni della forma:

$$Fx_{t+k} + Gu_{t+k} \leq H, k = 0, \dots, N_p - 1$$

dove, le matrici F , G e H individuano le condizioni di vincolo.

Applicando l'algoritmo di controllo predittivo in una sua forma canonica, la legge di controllo per ogni singola fase operativa sarebbe ottenuta applicando la seguente strategia "receding-horizon":

1. all'istante t , ricavare x_t ;
2. risolvere il problema di ottimizzazione:

$$\min_U J(U, x_{t|t}, N_p, N_c)$$

soggetto alle condizioni viste in precedenza;

3. applicare il primo elemento della sequenza

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



soluzione U del problema di ottimizzazione come azione di controllo effettiva: $u_t = u_{t|t}$;

4. ripetere l'intera procedura al tempo $t+1$.

Per ogni singola fase di una delle due modalità di generazione indicate, si utilizzano opportune scelte del funzionale di costo J e delle matrici F , G e H che individuano le condizioni di vincolo.

A titolo esemplificativo si riportano delle scelte possibili per la prima modalità di generazione di energia di cui sopra. In questa modalità la "forza utile" F_t risulta essere la forza di trazione dei cavi. Inoltre, poiché l'unità di manovra è fissa, $\alpha=0, \dot{\alpha}=0$ e pertanto queste due variabili non compaiono nelle equazioni del modello. Siano $\underline{r}$ e $\bar{r}$ la lunghezza minima e massima dei cavi durante le fasi di volo. Si considera che il vento sia nella direzione X . Le condizioni di vincolo sono le stesse per entrambi le fasi di trazione e di recupero, ad esempio:

$$\vartheta_t \leq \bar{\vartheta} < \pi/2$$

$$|u_t| \leq \bar{u}, \quad |u_t - u_{t-1}| \leq \Delta$$

La prima condizione indica che durante il volo, il profilo alare non deve avvicinarsi

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)



eccessivamente al suolo. La seconda indica che il controllo differenziale della posizione dei cavi per motivi fisici non può essere superiore ad assegnati valori sia come valore assoluto sia come variazione tra un tempo di campionamento e l'altro.

La fase di trazione inizia con il profilo alare in una assegnata posizione iniziale $\vartheta = \vartheta_1, \phi = 0, r = \underline{r}$. Durante questa fase il controllo prevede che il profilo alare eserciti una forza di trazione F sui cavi estendendone la lunghezza, così che gli attuatori elettrici vengono trascinati dagli argani generando energia elettrica. Gli attuatori del sistema 1 possono essere ovviamente controllati da un opportuno sistema di regolazione in modo tale che la velocità di srotolamento sia costante e quindi $\dot{r} = \bar{v}^{ref}$, con $\bar{v}^{ref} > 0$ assegnato. Come funzionale di costo, in questa fase di trazione si usa:

$$J(U, x_{t_0}, N_p, N_c) = - \sum_{k=0}^{N_p-1} \Delta r_{t+k} F_{t+k}$$

la cui minimizzazione porta a una massimizzazione della energia elettrica generata durante l'intervallo di predizione.

La fase di trazione termina quando i cavi raggiungono la loro massima lunghezza, cioè $r = \bar{r}$,

PAOLO CARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



condizione dalla quale inizia la fase di recupero. L'obiettivo in questa fase è quella di riportare il profilo alare alla posizione iniziale posizione iniziale $\mathcal{G}=\mathcal{G}_i, \phi=0, r=\underline{r}$, da cui iniziare una nuova fase di trazione, spendendo la minima quantità di energia. Questo viene ottenuto mediante l'attuazione di tre sottofasi. Nella prima sottofase, si sceglie $v_i^{ref} = \bar{v}^{ref} e^{-\lambda t}, \lambda > 0$ e:

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} [\mathcal{G}_{t+k}^2 + (|\phi_{t+k}| - \pi/2)^2]$$

La minimizzazione di questo funzionale equivale a portare il profilo alare in una zona dove $\mathcal{G}$ è piccolo e ϕ è vicino a $\pi/2$, zona dalla quale è possibile recuperare i cavi con un basso consumo di energia. Questa prima sottofase di recupero termina quando J ha raggiunto un valore "sufficientemente piccolo", e ha inizio la seconda sottofase in cui si riduce la lunghezza dei cavi. Pertanto si sceglie $v_i^{ref} = \underline{v}^{ref} (e^{-\lambda t} - 1), \lambda > 0, \underline{v}^{ref} > 0$ e come indice da minimizzare:

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} |\Delta r_{t+k}| F_{t+k}$$

che misura l'energia richiesta per l'avvolgimento dei cavi durante l'intervallo di predizione. Questa seconda sottofase di recupero termina quando la

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)



lunghezza dei cavi ha raggiunto la lunghezza minima r . Ha quindi inizio la terza sottofase, il cui scopo è di riportare il profilo alare nella posizione da cui farlo ripartire per una nuova fase di trazione. Pertanto si sceglie si sceglie $v_t^{ref} = -\underline{v}^{ref} e^{-\lambda t}$, $\lambda > 0$ e:

$$J(U, x_{tl}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} [(\mathcal{G}_{t+k} - \mathcal{G}_l)^2 + \phi_{t+k}^2]$$

Questa terza ed ultima sottofase termina quando J ha raggiunto un valore "sufficientemente piccolo", ponendo termine alla fase di recupero e permettendo l'inizio di un nuovo ciclo di trazione/recupero.

Nella seconda modalità di generazione di energia di cui sopra con traiettoria circolare, la "forza utile" F_t risulta essere la componente tangenziale alla traiettoria della forza di trazione dei cavi. Gli attuatori elettrici trascinati dal braccio della "giostra" 20 cui sono collegati i cavi sono controllati con un opportuno sistema di regolazione in modo tale che la velocità di rotazione della giostra 20 sia costante $\dot{\alpha} = \bar{v}$ con $\bar{v} > 0$ assegnato e si considera $v_t^{ref} = \bar{v} \forall t$. Si considera inoltre che la lunghezza dei cavi sia costante. Le condizioni di vincolo sono le stesse

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



per tutte le fasi, ad esempio:

$$\vartheta_i \leq \bar{\vartheta} < \pi/2$$

$$|u_i| \leq \bar{u}, \quad |u_i - u_{i-1}| \leq \Delta$$

La fase di trazione con mura a destra inizia per $\alpha=0$ e con il profilo alare in una assegnata posizione iniziale $\vartheta=\vartheta_i, \phi=\phi_i$.

Come funzionale di costo, in questa fase di trazione si usa:

$$J(U, x_{it}, N_p, N_c) = - \sum_{k=0}^{N_p-1} R \Delta \alpha_{t+k} F_{t+k}$$

la cui minimizzazione porta a una massimizzazione della energia elettrica generata durante l'intervallo di predizione.

Questa fase termina per $\alpha=\bar{\alpha}$, angolo in cui il profilo alare non è più in grado di fornire un momento positivo. Inizia dunque la fase di sospensione trazione e cambio mura, composta di due sottofasi. Nella prima sottofase il controllo conduce il volo del profilo alare in modo da offrire la minima resistenza. Questo è ottenuto scegliendo come funzionale:

$$J(U, x_{it}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} R \Delta \alpha_{t+k} F_{t+k}$$

Questa fase termina per $\alpha=\bar{\alpha}_c < \bar{\alpha}$, in cui inizia la seconda sottofase, nella quale il sistema porta il profilo alare nella posizione $\vartheta=\vartheta_{II}, \phi=\phi_{II}$, adatta per iniziare la successiva fase di trazione con mura a sinistra. Ciò si ottiene scegliendo:

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

By

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} [(\mathcal{G}_{t+k} - \mathcal{G}_{II})^2 + (\phi_{t+k} - \phi_{II})^2]$$

Per $\alpha = \bar{\alpha}$ inizia la fase di trazione con mura a sinistra, in cui per massimizzare l'energia generata si utilizza lo stesso funzionale J della precedente fase di trazione. Questa fase di trazione termina per $\alpha = 0$, in cui avviene il cambio di mura. In questa fase si sceglie:

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} [(\mathcal{G}_{t+k} - \mathcal{G}_I)^2 + (\phi_{t+k} - \phi_I)^2]$$

La fase termina quando J ha raggiunto un valore "sufficientemente piccolo", indicando che la posizione del profilo alare è nella posizione adatta per iniziare una nuova fase di trazione con mura destra.

L'implementazione canonica delle procedure di cui sopra richiede la soluzione del problema di ottimizzazione del funzionale di costo J ad ogni istante di campionamento, compito difficile da svolgersi in tempo reale nei tempi di campionamento richiesti (dell'ordine di 0,1-0,2 sec.) da mezzi di elaborazione di costo accettabile ed in relazione ai tempi di reazione necessari ad un controllo efficiente del volo di un profilo alare.

Per superare vantaggiosamente tale inconveniente, per l'implementazione del procedimento secondo la presente invenzione, si

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)

PG

consideri che il controllo MPC u_t risulta essere una funzione nonlineare dello stato x_t , ovvero:

$$u_t = f(x_t, W_t, v_t^{ref}) = f(z_t)$$

La funzione $f(z)$ non è conosciuta esplicitamente, ma un certo numero di valori di $f(z)$ può essere conosciuto tramite una procedura MPC off-line, partendo da assegnati valori $\tilde{z}_k$, $k=1, \dots, M$.

Il procedimento secondo la presente invenzione la presente invenzione comprende quindi le fasi di:

- calcolare:

$$\tilde{u}_k = f(\tilde{z}_k), \quad k=1, \dots, M$$

- dai valori $\tilde{z}_k, \tilde{u}_k$ $k=1, \dots, M$, ottenere una approssimazione $\hat{f}$ di f . Ciò può avvenire con tecniche di approssimazione di funzioni a partire da un certo numero finito di corrispondenze. Tale elaborazione può essere effettuata in modi diversi (di per sé sostanzialmente noti), ad esempio con l'impiego di reti neurali. Questi metodi presentano però alcuni problemi dovuti al fatto che normalmente la funzione approssimante è ottenuta mediante un algoritmo di ottimizzazione nonlineare e non è possibile sapere alla terminazione dell'algoritmo se il livello di approssimazione

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. n. 771)

ottenuto è adeguato oppure se il numero M di valori calcolato fuori linea è sufficiente.

Per superare queste limitazioni, si procede come segue.

Si definiscano le funzioni:

$$f_u(z, \gamma) = \min_{k=1, \dots, M} (\tilde{u}_k + \gamma \|z - \tilde{z}_k\|)$$

$$f_l(z, \gamma) = \max_{k=1, \dots, M} (\tilde{u}_k - \gamma \|z - \tilde{z}_k\|)$$

Si calcola:

$$\gamma^* = \inf_{\gamma: f_u(\tilde{z}_k, \gamma) \geq \tilde{u}_k, k=1, \dots, M} \gamma$$

La stima $\hat{f}$ di f è quindi data da:

$$\hat{f}(z) = \frac{1}{2} [f_u(z, \gamma^*) + f_l(z, \gamma^*)]$$

Si supponga per semplicità che i punti $\tilde{z}_k$ siano scelti su una griglia uniforme di una regione rettangolare Z che comprende gli intervalli in cui le variabili x, W, v^{ref} si trovano ad operare. Allora risulta che:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} |f(z) - \hat{f}(z)| = 0, \quad \forall z \in Z$$

Inoltre, per un M dato, l'errore di stima $f(z) - \hat{f}(z)$ è limitato come:

$$|f(z) - \hat{f}(z)| \leq \frac{1}{2} [f_u(z, \gamma^*) - f_l(z, \gamma^*)], \quad \forall z \in Z$$

Ciò permette di verificare se $\hat{f}$ fornisce una

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

sufficiente approssimazione di f o se è necessario un valore di M più grande.

Il controllo MPC può così essere implementato on-line, prevedendo che i mezzi di elaborazione e controllo calcolino, sulla base dei segnali ricevuti dalla periferia del sistema 1, la funzione $\hat{f}(z_i)$ ad ogni istante di campionamento:

$$u_i = \hat{f}(z_i)$$

In altre parole, operando in questo modo, è possibile calcolare la suddetta approssimazione risolvendo M problemi di ottimizzazione off-line, senza dunque essere assoggettati a particolari vincoli né in termini di potenza elaborativa disponibile, né in termini di tempo di elaborazione.

L'approssimazione così calcolata può quindi essere resa disponibile memorizzando in una memoria associata ai mezzi di elaborazione e controllo l'approssimazione $\hat{f}$ della legge di controllo.

I mezzi di elaborazione e controllo potranno quindi controllare in tempo reale il volo del profilo alare impiegando l'approssimazione $\hat{f}$ al posto della legge di controllo f vera e propria.

È del tutto evidente che la presente

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)



invenzione si riferisca inoltre ad un programma di computer comprendente mezzi di codice di programma di computer atti ad eseguire tutte o parte delle fasi del procedimento sopra indicato quando tale programma è eseguito su un computer o, per esempio, sui mezzi di elaborazione e controllo del sistema 1 secondo la presente invenzione.

In una sua realizzazione alternativa, il sistema e/o il procedimento secondo la presente invenzione possono trovare una valida applicazione anche nel settore nautico, per il traino delle imbarcazioni mediante lo sfruttamento dell'energia eolica.

In tal caso, tutti i componenti del sistema secondo la presente invenzione descritti precedentemente sono collocati su un'imbarcazione a vela o a motore. A differenza dell'applicazione precedentemente descritta, l'obiettivo primario del sistema non consiste più nella conversione dell'energia eolica in energia elettrica ma nello sfruttamento della forza del vento per il traino dell'imbarcazione e dunque nella conversione dell'energia eolica in energia meccanica.

Analogamente all'applicazione precedente, il sistema di controllo è programmato per massimizzare

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



l'energia che il profilo alare di potenza è in grado di sottrarre al vento in modo da ottimizzare con continuità lo sfruttamento delle correnti eoliche, ma evitando che il carico dei cavi divenga eccessivo e danneggi i componenti del sistema. Quindi la trasmissione della potenza non avviene più azionando un generatore mediante la rotazione di un argano, ma limitando il più possibile lo srotolamento dei cavi in modo che il profilo alare si trovi sempre a proravia dell'imbarcazione, alla quale il profilo alare è connesso tramite i cavi stessi, e quest'ultima si muova rispetto a un sistema di riferimento fisso.

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)



RIVENDICAZIONI

1. Sistema (1) di controllo automatico del volo di almeno un profilo alare di potenza (2), detto profilo alare di potenza (2) essendo controllato da un'unità di manovra (4) dotato di due argani ai quali detto profilo alare di potenza (2) è collegato mediante due rispettivi cavi di manovra (6), caratterizzato dal fatto di comprendere:

- primi mezzi di rilevamento (3) a bordo di detto profilo alare di potenza (2) atti a rilevare prime informazioni riguardanti almeno una posizione e un orientamento nello spazio di detto profilo alare di potenza (2) e delle accelerazioni alle quali detto profilo alare di potenza (2) è sottoposto;

- secondi mezzi di rilevamento (5) a terra atti a rilevare seconde informazioni riguardanti almeno un'entità di una tensione su detti cavi di manovra (6) di detto profilo alare di potenza (2) e una loro posizione relativa, una direzione ed un'intensità di una corrente eolica W all'interno della quale è immerso detto profilo alare (2);

- mezzi di elaborazione e controllo (7) di dette prime e dette seconde informazioni (P), atti a trasformare il contenuto di dette informazioni (P)

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



in un comando meccanico relativo ad una funzione di controllo (U) agente su detti argani di detta unità di manovra (4) per manovrare detto profilo alare di potenza (2) lungo una traiettoria di volo massimizzante una quantità di energia cinetica sottratta a detta corrente eolica W ; e

- un sistema di trasmissione di dette prime informazioni a detti mezzi di elaborazione e controllo (7).

2. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che dette seconde informazioni riguardano posizione e spostamenti di detta unità di manovra (4) lungo una sua traiettoria di movimento

3. Sistema (1) secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che detto sistema di trasmissione trasmette dette prime informazioni a detti mezzi di elaborazione e controllo (7).

4. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti primi mezzi di rilevamento (3) comprendono accelerometri triassiali.

5. Sistema (1) secondo la rivendicazione 4, caratterizzato dal fatto che detti accelerometri triassiali sono di tipo MEMS.

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



6. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti primi mezzi di rilevamento (3) comprendono una bussola elettronica.

7. Sistema (1) secondo la rivendicazione 6, caratterizzato dal fatto che detta bussola elettronica è un magnetometro Fluxgate.

8. Sistema (1) secondo la rivendicazione 4, caratterizzato dal fatto che ciascuno di due di detti accelerometri triassiali è collocato in una rispettiva estremità di detto profilo alare (2) in corrispondenza di un'unione di detti cavi di manovra (6) con delle pareti di detto profilo alare (2).

9. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti secondi mezzi di rilevamento (5) comprendono strain gauges atti a misurare una deflessione di detti cavi di manovra (6).

10. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti secondi mezzi di rilevamento (5) comprendono encoder su detti argani di detta unità di manovra (4).

11. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti secondi mezzi di

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



rilevamento (5) comprendono almeno un anemometro.

12. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti secondi mezzi di rilevamento (5) comprendono almeno un anemoscopio.

13. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti secondi mezzi di rilevamento (5) comprendono un sistema di visione artificiale a terra.

14. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detto sistema di trasmissione è a fibra ottica.

15. Sistema (1) secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detto sistema di trasmissione è wireless.

16. Procedimento di controllo automatico del volo di profili alari di potenza, caratterizzato dal fatto di realizzare una funzione di controllo (U) mediante una metodologia di controllo predittivo basato su un modello della dinamica di volo di detto profilo alare (2) a partire da dette informazioni (P).

17. Procedimento secondo la rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che detto modello della dinamica di volo di detto profilo alare (2) è definito come:

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



$$x_{t+1} = g(x_t, u_t, W_t, v_t^{ref})$$

$$F_t = h(x_t, u_t) .$$

18. Procedimento secondo la rivendicazione 16, caratterizzato dal fatto che detta funzione di controllo (U) espressa come $u_t = f(x_t, W_t, v_t^{ref}) = f(z_t)$ è approssimata da una funzione $\hat{f}$ tale che $u_t = \hat{f}(z_t)$.

19. Procedimento secondo la rivendicazione 17, caratterizzato dal fatto che detta funzione di controllo (U) espressa come $u_t = \hat{f}(z_t)$ è calcolata in modo off-line.

20. Procedimento secondo la rivendicazione 17, caratterizzato dal fatto che detta funzione approssimata $\hat{f}$ è stimata come:

$$\hat{f}(z) = \frac{1}{2} [f_u(z, \gamma^*) + f_l(z, \gamma^*)]$$

dove:

$$f_u(z, \gamma) = \min_{k=1, \dots, M} (\tilde{u}_k + \gamma \|z - \tilde{z}_k\|)$$

$$f_l(z, \gamma) = \max_{k=1, \dots, M} (\tilde{u}_k - \gamma \|z - \tilde{z}_k\|)$$

$$\gamma^* = \inf_{\gamma: f_u(\tilde{z}_k, \gamma) \geq \tilde{u}_k, k=1, \dots, M} \gamma .$$

21. Procedimento secondo le rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di comprendere le fasi di:

a) definire un periodo di campionamento Δt ;

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)



- b) fornire un vettore W_t ;
- c) fornire una funzione v_t^{ref} ;
- d) fornire un vettore di stato

$$x_t = [\vartheta_t \ \phi_t \ r_t \ \Delta\vartheta_t \ \Delta\phi_t \ \Delta r_t \ s_t \ \Delta s_t];$$

- e) definire dei vincoli

$$Fx_{t+k} + Gu_{t+k} \leq H, k=0, \dots, N_p-1;$$

- f) definire un orizzonte di predizione N_p ed un orizzonte di controllo tali che $N_c \leq N_p$;

- g) minimizzare una funzione di costo

$$J(U, x_{t|t}, N_p, N_c) = \sum_{k=0}^{N_p-1} L(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}, W_{t+k}, v_{t+k}^{ref}) \text{ ed ottenere almeno}$$

una sequenza di controllo $u_k, k=1, \dots, M$;

- h) fornire una sequenza di valori $\tilde{z}_k, k=1, \dots, M$;

- i) calcolare $\tilde{u}_k = f(\tilde{z}_k), k=1, \dots, M$ da detti valori assegnati $\tilde{z}_k, k=1, \dots, M$;

- j) da detti $\tilde{z}_k, \tilde{u}_k, k=1, \dots, M$, ottenere detta approssimazione $\hat{f}$ di detta f ;

- k) calcolare $u_t = \hat{f}(z_t)$ in modo off-line ad ogni istante di campionamento Δt ;

- l) memorizzare detti u_t in detti mezzi di elaborazione e controllo (7) di detto sistema (1).

22. Procedimento secondo le rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di essere

PAOLO GARAVELLI
 (Iscriz. Albo n. 771)

dy

implementato mediante un sistema (1) secondo le rivendicazioni da 1 a 15.

23. Programma di computer comprendente mezzi di codice di programma di computer atti ad eseguire le fasi di detto procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti quando tale programma è eseguito su un computer.

24. Programma di computer secondo la rivendicazione 24 e contenuto su un supporto leggibile da un computer.

PAOLO GARAVELLI

(Iscriz. Albo n. 771)

Paolo Garavelli



CAMERA DI COMMERCIO
e INDUSTRIA
della Provincia di AOSTA
A. APTICIANATO E AGRICOLTURA

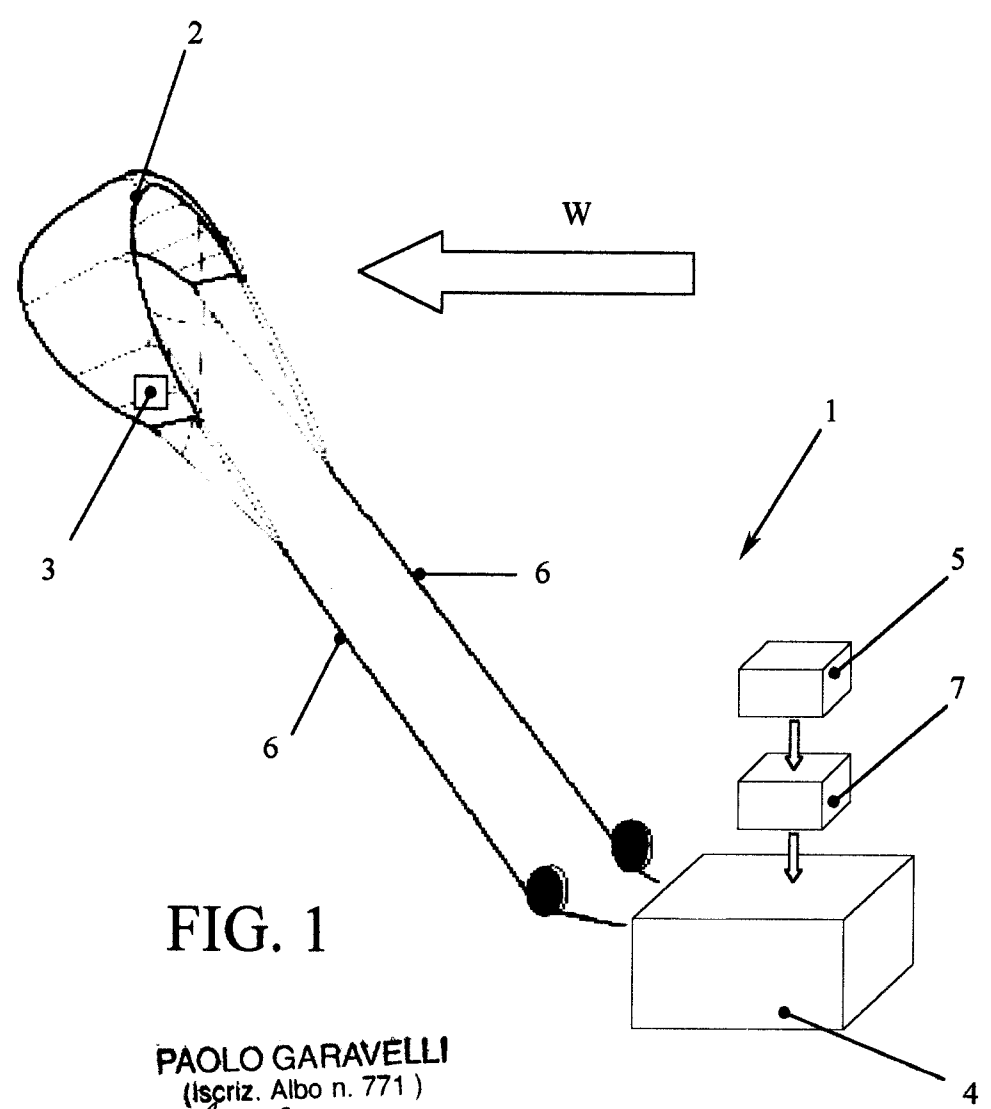


FIG. 1

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)
Paolo Garavelli

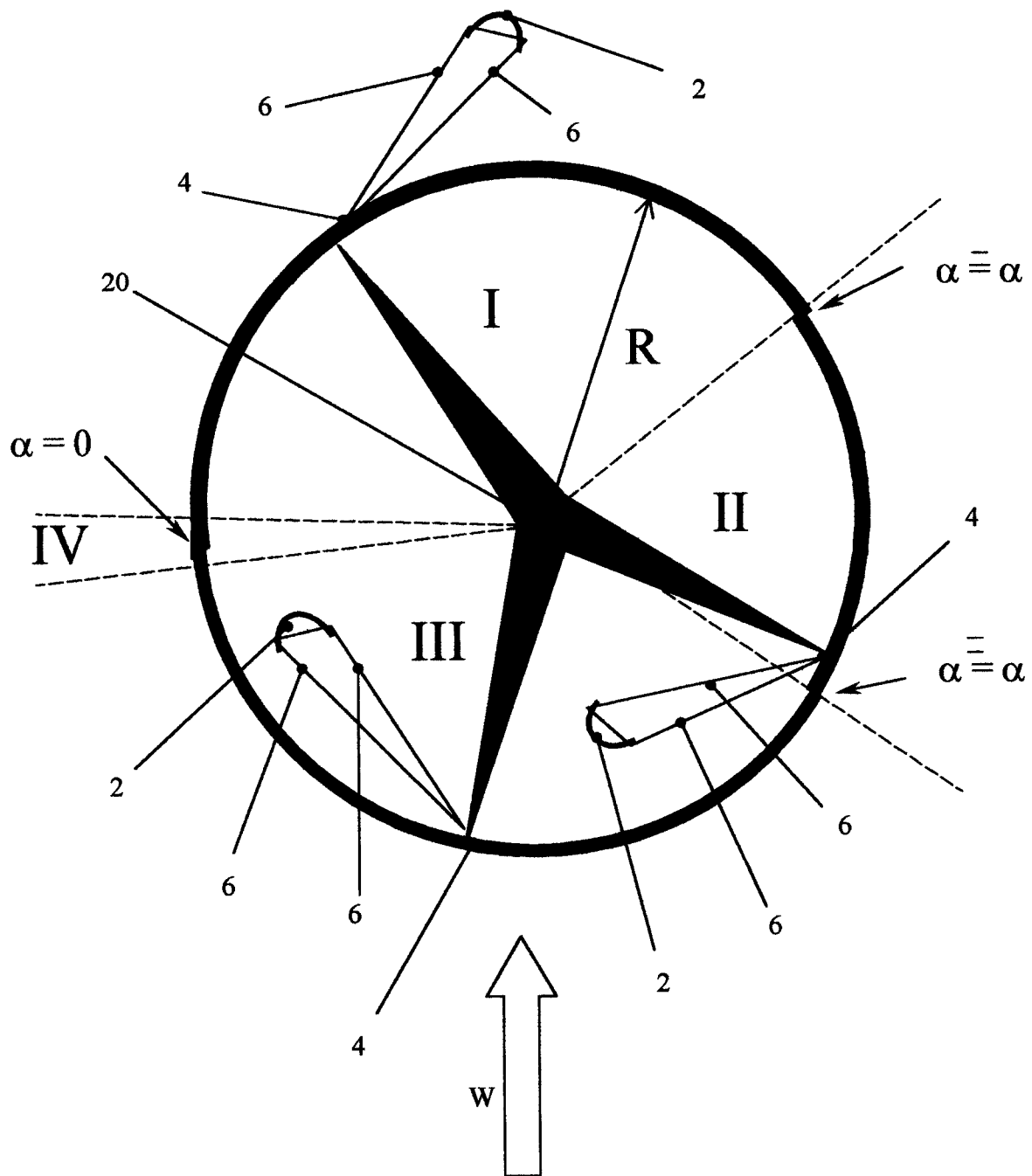


FIG. 2

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Paolo Garavelli



