

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4263074号  
(P4263074)

(45) 発行日 平成21年5月13日(2009.5.13)

(24) 登録日 平成21年2月20日(2009.2.20)

(51) Int.Cl. F I  
**B 2 5 J 9/10 (2006.01)** B 2 5 J 9/10

請求項の数 16 外国語出願 (全 33 頁)

(21) 出願番号	特願2003-375999 (P2003-375999)	(73) 特許権者	598057361
(22) 出願日	平成15年11月5日(2003.11.5)		クーカ・ロボター・ゲゼルシャフト・ミッ
(65) 公開番号	特開2004-284004 (P2004-284004A)		ト・ベシュレンクテル・ハフツング
(43) 公開日	平成16年10月14日(2004.10.14)		KUKA ROBOTER GMBH
審査請求日	平成18年9月22日(2006.9.22)		ドイツ、デー-86165 アウグスブル
(31) 優先権主張番号	10251600:6		ク、ツークシュピッツシュトラ-セ、14
(32) 優先日	平成14年11月6日(2002.11.6)		O
(33) 優先権主張国	ドイツ(DE)	(74) 代理人	100064746
			弁理士 深見 久郎
		(74) 代理人	100085132
			弁理士 森田 俊雄
		(74) 代理人	100083703
			弁理士 仲村 義平
		(74) 代理人	100096781
			弁理士 堀井 豊

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 マニピュレータの動作を制御するための方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

産業用ロボットなどのマニピュレータの方位誘導のための方法であって、姿勢の所与の点列がスプラインにより内挿され、方位は、

【数1】

$$q(\alpha, \beta, \varphi) = (\cos(\varphi/2), \sin(\varphi/2) \cdot v(\alpha, \beta))$$

$$v(\alpha, \beta) = (\cos(\alpha)\cos(\beta), \sin(\alpha)\cos(\beta), \sin(\beta))$$

(ここで、 $v$  は回転ベクトル  $v = v(x, y, z)$  の球座標を示す)

に従った四次元単位球上の四元数により表現され、

- 以下のステップによる運動最適対  $(v_i, \varphi_i)$  の決定

a) すべての  $i = 1, \dots, n-1$  について  $q_i^T q_{i+1} > 0$  となるような  $q_i$  の符号の適合

b) すべての  $i = 1, \dots, n$  について、

【数2】

$$q_i = (\cos(\frac{1}{2}\varphi_i), \sin(\frac{1}{2}\varphi_i) v_i)$$

という条件での可能な対  $(v_i, \varphi_i)$  の決定

c)

## 【数3】

$$iStart \in I := \{i = 1, \dots, n \mid q_i \neq (\pm 1, 0, 0, 0)\}$$

という条件でのランダム開始対  $(v_{iStart}, \varphi_{iStart})$  の選択

d)  $j = iStart$  を除くすべての  $j \in \{1, \dots, n\}$  について、ステップ e) ~ g) に従った基準対  $(v_i, \varphi_i)$  から始まる1つの対  $(v_j, \varphi_j)$  の各場合での正確な決定 (ここで  $i \in \{1, \dots, n\}$  は隣接指数であり、つまり  $i = j + 1$  または  $i = j - 1$  であり、また、 $i = iStart$  または基準対のいずれかは既にステップ e) ~ g) に従って適合されている)

e)

10

## 【数4】

$$\begin{aligned} |\varphi_{j,1}(k^*) - \varphi_i| &= \min\{|\varphi_{j,1}(k) - \varphi_i|, k \in Z\} \\ &= \min\{|\varphi_j + 4k\pi - \varphi_i|, k \in Z\}, \\ |\varphi_{j,2}(h^*) - \varphi_i| &= \min\{|\varphi_{j,2}(h) - \varphi_i|, h \in Z\} \\ &= \min\{|-\varphi_j + 4h\pi - \varphi_i|, h \in Z\} \end{aligned}$$

となるような、 $k^*, h^* \in Z$  の決定

20

f) 次に  $j \in I$  について、

## 【数5】

$$\begin{aligned} d_{j,1} &= |\arccos(v_i^T v_j)| + |\varphi_{j,1}(k^*) - \varphi_i|, \\ d_{j,2} &= |\arccos(v_i^T (-v_j))| + |\varphi_{j,2}(h^*) - \varphi_i| \end{aligned}$$

の決定、または

## 【数6】

$$j \notin I$$

30

について

## 【数7】

$$\begin{aligned} d_{j,1} &= |\varphi_{j,1}(k^*) - \varphi_i|, \\ d_{j,2} &= |\varphi_{j,2}(h^*) - \varphi_i| \end{aligned}$$

の決定

g) 次に各場合における  $(v_j, \varphi_j)$  の選択

(ここで  $j \in I$  について

## 【数8】

40

$$(v_j, \varphi_j) = \begin{cases} (v_j, \varphi_{j,1}(k^*)), & d_{j,1} \leq d_{j,2} \\ (-v_j, \varphi_{j,2}(h^*)), & d_{j,1} > d_{j,2} \end{cases}$$

または

## 【数9】

$$j \notin I$$

50

について

【数 1 0】

$$(v_j, \varphi_j) = \begin{cases} (v_i, \varphi_{j,1}(k^*)) & d_{j,1} \leq d_{j,2} \text{ の場合} \\ (v_i, \varphi_{j,2}(h^*)) & d_{j,1} > d_{j,2} \text{ の場合} \end{cases}$$

である)

- 以下のステップによる球座標表現における  $v_i$  からの対  $(\alpha_i, \beta_i)$  の決定
- h) すべての  $i \in I$  について、 $v_i$  の標準球座標  $(\alpha_i, \beta_i)$  の計算

10

【数 1 1】

$$v_i = (\cos(\alpha_i) \cos(\beta_i), \sin(\alpha_i) \cos(\beta_i), \sin(\beta_i))$$

i)  $J := \{v_j \mid (0, 0, \pm 1) \text{ の条件で } j \in I\}$ ,

$L := \{v_j \mid (0, 0, \pm 1) \text{ の条件で } j \in I\}$  の規定、およびしたがって  $R \times$

$R$  からの拡張球座標の規定

- $i \in J$  について

【数 1 2】

$$(\alpha_{i,1}(h), \beta_{i,1}(k)) = (\alpha_i + 2h\pi, \beta_i + 2k\pi), \quad h, k \in \mathbb{Z};$$

$$(\alpha_{i,2}(l), \beta_{i,2}(m)) = (\alpha_i + \pi + 2l\pi, \pi - \beta_i + 2m\pi), \quad l, m \in \mathbb{Z};$$

- $i \in L$  について

【数 1 3】

$$(\alpha_i(x), \beta_i(k)) = (x, \beta_i + 2k\pi), \quad x \in \mathbb{R}, k \in \mathbb{Z};$$

j)  $j_{\text{Start}} \in J$  の条件でのランダム開始対  $(\alpha_{j_{\text{Start}}}, \beta_{j_{\text{Start}}})$  の固定

k)  $j = j_{\text{Start}}$  を除くすべての  $j \in I$  について、各場合においてステップ l) および m) に従った拡張極座標の決定

(ここで  $i \in I$  は  $j$  の近接指数であり、そのため  $i$  と  $j$  との間には  $k \in I$  はなく、また、 $i = j_{\text{Start}}$  または基準対  $(\alpha_i, \beta_i)$  のいずれかは既にステップ l) および m) に従って適合されている)

l)

【数 1 4】

$$d_{j,1} = \min\{|\alpha_{j,1}(h) - \alpha_i| + |\beta_{j,1}(k) - \beta_i|, \text{ ここで } h, k \in \mathbb{Z}\}$$

$$= |\alpha_{j,1}(h^*) - \alpha_i| + |\beta_{j,1}(k^*) - \beta_i|;$$

$$d_{j,2} = \min\{|\alpha_{j,2}(l) - \alpha_i| + |\beta_{j,2}(m) - \beta_i|, \text{ ここで } l, m \in \mathbb{Z}\}$$

$$= |\alpha_{j,2}(l^*) - \alpha_i| + |\beta_{j,2}(m^*) - \beta_i|$$

という条件の下での値  $h^*, k^*, l^*, m^* \in \mathbb{Z}$  の  $j \in J$  の決定、または

【数 1 5】

$$|\beta_j(k^*) - \beta_i| = \min\{|\beta_j(k) - \beta_i|, k \in \mathbb{Z}\}$$

50

という条件の下での値  $k^*$   $Z$  の  $j$   $L$  についての決定

m) 次に  $(j, j)$  の選択

(ここで  $j$   $J$  について

【数 16】

$$(\alpha_j, \beta_j) = \begin{cases} (\alpha_{j,1}(h^*), \beta_{j,1}(k^*)) & d_{j,1} \leq d_{j,2} \\ (\alpha_{j,2}(l^*), \beta_{j,2}(m^*)) & d_{j,1} > d_{j,2} \end{cases}$$

10

または  $j$   $L$  について

【数 17】

$$(\alpha_j, \beta_j) = (\alpha_i, \beta_j(k^*))$$

である)

n) ステップ a) ~ m) に従って決定された三重数の数の選択

【数 18】

$$(\alpha_i, \beta_i, \varphi_i) = \begin{cases} (\alpha_i, \beta_i, \varphi_i) & i \in J \text{ について} \\ (*, \beta_i, \varphi_i) & i \in L \text{ について} \\ (*, *, \varphi_i) & i \notin I \text{ について} \end{cases}$$

20

(ここで \* で示された構成要素はランダムに選択可能である)

o) 三重数  $(\alpha_i, \beta_i, \varphi_i)$  における選択可能な構成要素の適合

- ステップ n) において選択された三重数  $(\alpha_i, \beta_i, \varphi_i)$  のスプラインによる内挿  
および

-  $q(\alpha_i, \beta_i, \varphi_i)$  における内挿関数の使用

により特徴付けられる方法。

30

【請求項 2】

$(\alpha_i, \beta_i, \varphi_i)$  の自由に選択可能な構成要素の適合は、

$$p = \begin{cases} \{1 \leq p < j_{Min} \text{ について } j_{Min}, \\ \{j_{Max} < p \leq n \text{ について } j_{Max} \end{cases}$$

および

$$p = \begin{cases} \{1 \leq p < i_{Min} \text{ について } i_{Min}, \\ \{i_{Max} < p \leq n \text{ について } i_{Max} \end{cases}$$

となるよう、

40

【数 19】

$$i_{Min} := \min \{i \in I\}$$

$$i_{Max} := \max \{i \in I\}$$

$$j_{Min} := \min \{j \in J\}$$

$$j_{Max} := \max \{j \in J\}$$

を用いて起こる、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

50

すべての  $i < p < j$  について隣接する  $i, j \in J$ 、つまり  
【数 2 0】

$$p \notin J$$

に対して、

【数 2 1】

$$\alpha_p = \alpha_i + (p - i)/(j - i) \cdot (\alpha_j - \alpha_i)$$

を選択し、それに応じて、すべての  $i < p < j$  について隣接する  $i, j \in I$ 、つまり  
【数 2 2】

$$p \notin I$$

に対して、

【数 2 3】

$$\beta_p = \beta_i + (p - i)/(j - i) \cdot (\beta_j - \beta_i)$$

を選択する、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

産業用ロボットなどのマニピュレータの方位誘導のための方法であって、姿態の所与の点列がスプラインにより内挿され、方位は、 $i = 1, \dots, n$  について実数の合計  $R^3$  へ拡張されたオイラー角  $A_i, B_i, C_i \in R$  により表現される、方法。

【請求項 5】

最小限の方位再設定のために連続して以下のステップ、つまり、

- 以下のステップによる方位  $(A_i, B_i, C_i)$  の表現

a) 標準オイラー角  $(A_i, B_i, C_i)$  の決定

b)  $I := \{ i = 1, \dots, n \mid B_i = \pi/2 + 2k\pi, k \in Z \}$  および  $i \notin I$  について

【数 2 4】

$$(A_{i,1}(g), B_{i,1}(h), C_{i,1}(k))$$

$$= (A_i + 2g\pi, B_i + 2h\pi, C_i + 2k\pi), g, h, k \in Z; \text{ および}$$

$$(A_{i,2}(l), B_{i,2}(m), C_{i,2}(o))$$

$$= (A_i + \pi + 2l\pi, \pi - B_i + 2m\pi, C_i + \pi + 2o\pi),$$

$$l, m, o \in Z;$$

の規定

c)  $J := \{ i = 1, \dots, n \mid B_i = \pi/2 + 2k\pi, k \in Z \}$  および  $i \notin J$  について

【数 2 5】

$$(A_i(t), B_i(h), C_i(k, t))$$

$$= (A_i + t, B_i + 2h\pi, C_i + t + 2k\pi),$$

$$t \in R, h, k \in Z$$

の規定

d)  $L := \{ i = 1, \dots, n \mid B_i = \pi/2 + 2k\pi, k \in Z \}$  および  $i \notin L$  について、

10

20

30

40

【数 26】

$$(A_i(t), B_i(h), C_i(k, t))$$

$$= (A_i + t, B_i + 2h\pi, C_i - t + 2k\pi),$$

$$t \in \mathbb{R}, h, k \in \mathbb{Z};$$

の規定

e)  $i$  Start  $I$  という条件でのランダム開始対  $(A_{iStart}, B_{iStart}, C_{iStart})$  の選択

10

f)  $j = i$  Start から離れたすべての  $j \in \{1, \dots, n\}$  について、ステップ  $g$  および  $h$  ) に従った拡張オイラー角  $(A_j, B_j, C_j)$  の決定

(ここで  $i \in \{1, \dots, n\}$  は近接指数であり、つまり  $i = j + 1$  または  $i = j - 1$  であり、加えて、 $i = i$  Start または基準対  $(A_i, B_i, C_i)$  のいずれかは既にステップ  $g$  ) および  $h$  ) に従って適合されている)

g)  $j \in I$  について、 $g^*, h^*, k^*$  または  $l^*, m^*, o^*$  についての最小値を仮定して

【数 27】

$$d_{j,1} = \min\{|A_{j,1}(g) - A_i| + |B_{j,1}(h) - B_i| + |C_{j,1}(k) - C_i|, g, h, k \in \mathbb{Z}\};$$

20

$$d_{j,2} = \min\{|A_{j,2}(l) - A_i| + |B_{j,2}(m) - B_i| + |C_{j,2}(o) - C_i|, l, m, o \in \mathbb{Z}\},$$

の決定、および

【数 28】

$$(A_j, B_j, C_j) = \begin{cases} (A_{j,1}(g^*), B_{j,1}(h^*), C_{j,1}(k^*)), \\ | d_{j,1} \leq d_{j,2} \text{ の場合} \\ \\ (A_{j,2}(l^*), B_{j,2}(m^*), C_{j,2}(o^*)), \\ | d_{j,1} > d_{j,2} \text{ の場合} \end{cases}$$

30

の選択

h)  $j \in J$  または  $j \in L$  について、 $h, k \in \mathbb{Z}$  および  $t \in \mathbb{R}$  を条件とした

【数 29】

$$dA_j(t) := |A_j(t) - A_i|$$

$$dB_j(h) := |B_j(h) - B_i|$$

$$dC_j(k, t) := |C_j(k, t) - C_i|$$

40

の規定；

【数 30】

$$dB_j(h^*) = \min\{dB_j(h), h \in \mathbb{Z}\};$$

を条件とした、 $h^* \in \mathbb{Z}$  の決定；

50

t に対する  $dA_j(t)$  または  $dC_j(k, t)$  のゼロ点の計算；  
 (ここで  $ta_{0,j}$  は  $dA_j(t)$  のゼロ点であり、 $tc_{0,j}(k)$  はパラメータ  $k$  に依存する  $dC_j(k, t)$  のゼロ点である)

ゼロ点の最小間隔が存在するよう、つまり、  
 【数 3 1】

$$|ta_{0,j} - tc_{0,j}(k^*)| = \min\{|ta_{0,j} - tc_{0,j}(k)|, k \in Z\};$$

となるような  $k^* \in Z$  の選択；

$ta_{0,j}$  と  $tc_{0,j}(k^*)$  との間の  $t^*$  ランダムな選択；

10

および、  
 【数 3 2】

$$(A_j, B_j, C_j) = (A_j(t^*), B_j(h^*), C_j(k^*, t^*))$$

の選択

- 三重数  $(A_i, B_i, C_i)$  のスプラインによる内挿、および回転マトリックス  $R(A, B, C)$  における内挿関数の使用

が行なわれ、オイラー角  $A, B, C$  は、一般的な性質の制限なく、瞬間的な  $z$  軸、 $y$  軸または  $x$  軸のまわりでの回転を示す、請求項 4 に記載の方法。

20

【請求項 6】

$t^* = 1/2 (ta_{0,j} + tc_{0,j}(k^*))$  が選択される、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

マニピュレータの位置はその方位とは別個にパラメータ化される、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 8】

補助軸の動作は、マニピュレータの位置および/または方位とは別個にパラメータ化される、請求項 1 ~ 7 のいずれかに記載の方法。

【請求項 9】

姿勢の所与の点列をスプラインにより内挿するための内挿ユニットを有する、ロボットなどのマニピュレータの方位誘導のための装置であって、内挿ユニットは、

30

【数 3 3】

$$q(\alpha, \beta, \varphi) = (\cos(\varphi/2), \sin(\varphi/2)v(\alpha, \beta))$$

に従った四次元単位球上の四元数により方位を表現し、

以下のステップ、つまり、

-

【数 3 4】

$$v(\alpha, \beta) = (\cos(\alpha)\cos(\beta), \sin(\alpha)\cos(\beta), \sin(\beta))$$

40

という条件で

【数 3 5】

$$q(\alpha, \beta, \varphi) = (\cos(\frac{1}{2}\varphi), \sin(\frac{1}{2}\varphi) \cdot v(\alpha, \beta))$$

に従った四次元単位球上の各四元数の表現

(ここで、 $(v_1, v_2, v_3)$  (および  $r = 1$ ) は回転ベクトル  $v = v(v_1, v_2, v_3)$  の球座標を示し)

- 以下のステップによる運動最適対  $(v_1, v_2, v_3)$  の決定

50

- a) すべての  $i = 1, \dots, n-1$  について  $q_i^T q_{i+1} > 0$  となるような  $q_i$  の符号の適合  
 b) すべての  $i = 1, \dots, n$  について、

【数 3 6】

$$q_i = (\cos(\frac{1}{2}\varphi_i), \sin(\frac{1}{2}\varphi_i) v_i)$$

という条件での可能な対  $(v_i, \varphi_i)$  の決定

c)  $i \text{ Start } I := \{i = 1, \dots, n \mid q_i \cdot (\pm 1, 0, 0, 0)\}$  という条件でのランダム開始対  $(v_{i \text{ Start}}, \varphi_{i \text{ Start}})$  の選択

d)  $j = i \text{ Start}$  を除くすべての  $j \in \{1, \dots, n\}$  について、ステップ e) ~ g) に従った基準対  $(v_i, \varphi_i)$  から始まる 1 つの対  $(v_j, \varphi_j)$  の各場合での正確な決定 (ここで  $i \in \{1, \dots, n\}$  は隣接指数であり、つまり  $i = j + 1$  または  $i = j - 1$  であり、また、 $i = i \text{ Start}$  または基準対のいずれかは既にステップ e) ~ g) に従って適合されている)

e)

【数 3 7】

$$\begin{aligned} |\varphi_{j,1}(k^*) - \varphi_i| &= \min\{|\varphi_{j,1}(k) - \varphi_i|, k \in Z\} \\ &= \min\{|\varphi_j + 4k\pi - \varphi_i|, k \in Z\}, \\ |\varphi_{j,2}(h^*) - \varphi_i| &= \min\{|\varphi_{j,2}(h) - \varphi_i|, h \in Z\} \\ &= \min\{|-\varphi_j + 4h\pi - \varphi_i|, h \in Z\} \end{aligned}$$

となるような、 $k^*, h^* \in Z$  の決定

f) 次に  $j \in I$  について、

【数 3 8】

$$\begin{aligned} d_{j,1} &= |\arccos(v_i^T v_j)| + |\varphi_{j,1}(k^*) - \varphi_i|, \\ d_{j,2} &= |\arccos(v_i^T (-v_j))| + |\varphi_{j,2}(h^*) - \varphi_i| \end{aligned}$$

の決定、または

【数 3 9】

$j \notin I$

について

【数 4 0】

$$\begin{aligned} d_{j,1} &= |\varphi_{j,1}(k^*) - \varphi_i|, \\ d_{j,2} &= |\varphi_{j,2}(h^*) - \varphi_i|; \end{aligned}$$

の決定

g) 次に各場合における  $(v_j, \varphi_j)$  の選択 (ここで  $j \in I$  について

【数 4 1】

$$(v_j, \varphi_j) = \begin{cases} (v_j, \varphi_{j,1}(k^*)), & d_{j,1} \leq d_{j,2} \\ (-v_j, \varphi_{j,2}(h^*)), & d_{j,1} > d_{j,2} \end{cases}$$

または

【数 4 2】

 $j \notin I$ 

10

について

【数 4 3】

$$(v_j, \varphi_j) = \begin{cases} (v_j, \varphi_{j,1}(k^*)) & d_{j,1} \leq d_{j,2} \text{ の場合} \\ (v_j, \varphi_{j,2}(h^*)) & d_{j,1} > d_{j,2} \text{ の場合} \end{cases}$$

である)

20

- 以下のステップによる球座標表現における  $v_i$  からの対  $(\alpha_i, \beta_i)$  の決定
- h) すべての  $i \in I$  について、 $v_i$  の標準球座標  $(\alpha_i, \beta_i)$  の計算

【数 4 4】

$$v_i = (\cos(\alpha_i) \cos(\beta_i), \sin(\alpha_i) \cos(\beta_i), \sin(\beta_i))$$

- i)  $J := \{v_j = (0, 0, \pm 1) \text{ の条件で } j \in I\}$ ,
- $L := \{v_j = (0, 0, \pm 1) \text{ の条件で } j \in I\}$  の規定、およびしたがって  $R \times R$  からの拡張球座標の規定

- $i \in J$  について

30

【数 4 5】

$$(\alpha_{i,1}(h), \beta_{i,1}(k)) = (\alpha_i + 2h\pi, \beta_i + 2k\pi), \quad h, k \in Z;$$

$$(\alpha_{i,2}(l), \beta_{i,2}(m)) = (\alpha_i + \pi + 2l\pi, \pi - \beta_i + 2m\pi), \quad l, m \in Z;$$

- $i \in L$  について

【数 4 6】

$$(\alpha_i(x), \beta_i(k)) = (x, \beta_i + 2k\pi), \quad x \in R, k \in Z$$

- j)  $j_{\text{Start}} \in J$  の条件でのランダム開始対  $(\alpha_{j_{\text{Start}}}, \beta_{j_{\text{Start}}})$  の固定
- k)  $j = j_{\text{Start}}$  を除くすべての  $j \in I$  について、各場合においてステップ l) および m) に従った拡張極座標の単一の決定
- (ここで  $i \in I$  は  $j$  の近接指数であり、そのため  $i$  と  $j$  との間には  $k \in I$  はなく、また、 $i = j_{\text{Start}}$  または基準対  $(\alpha_i, \beta_i)$  のいずれかは既にステップ l) および m) に従って適合されている)

40

- l)

【数 4 7】

$$d_{j,1} = \min\{|\alpha_{j,1}(h) - \alpha_i| + |\beta_{j,1}(k) - \beta_i|, \text{ここで } h, k \in Z\}$$

$$= |\alpha_{j,1}(h^*) - \alpha_i| + |\beta_{j,1}(k^*) - \beta_i|;$$

$$d_{j,2} = \min\{|\alpha_{j,2}(l) - \alpha_i| + |\beta_{j,2}(m) - \beta_i|, \text{ここで } l, m \in Z\}$$

$$= |\alpha_{j,2}(l^*) - \alpha_i| + |\beta_{j,2}(m^*) - \beta_i|$$

という条件の下での値  $h^*, k^*, l^*, m^* \in Z$  の  $j \in J$  の決定、または

【数 4 8】

10

$$|\beta_j(k^*) - \beta_i| = \min\{|\beta_j(k) - \beta_i|, k \in Z\}$$

という条件の下での値  $k^* \in Z$  の  $j \in L$  についての決定

m) 次に  $(j, j)$  の選択  
(ここで  $j \in J$  について

【数 4 9】

$$(\alpha_j, \beta_j) = \begin{cases} (\alpha_{j,1}(h^*), \beta_{j,1}(k^*)), & d_{j,1} \leq d_{j,2} \\ (\alpha_{j,2}(l^*), \beta_{j,2}(m^*)), & d_{j,1} > d_{j,2} \end{cases}$$

20

または  $j \in L$  について

【数 5 0】

$$(\alpha_j, \beta_j) = (\alpha_i, \beta_j(k^*))$$

である)

n) ステップ a) ~ m) に従って決定された三重数の数の選択

30

【数 5 1】

$$(\alpha_i, \beta_i, \varphi_i) = \begin{cases} (\alpha_i, \beta_i, \varphi_i) & i \in J \text{ について} \\ (*, \beta_i, \varphi_i) & i \in L \text{ について} \\ (*, *, \varphi_i) & i \notin I \text{ について} \end{cases}$$

(ここで \* で示された構成要素はランダムに選択可能である)

o) 三重数  $(\alpha_i, \beta_i, \varphi_i)$  における選択可能な構成要素の適合

- ステップ n) において選択された三重数  $(\alpha_i, \beta_i, \varphi_i)$  のスプラインによる内挿  
および

40

-  $q(\alpha_i, \beta_i, \varphi_i)$  における内挿関数の使用

を行なうために設置される装置。

【請求項 10】

内挿ユニットは、

$$p = \begin{cases} \{1 \leq p < j_{Min} \text{ について } j_{Min}, \\ \{j_{Max} < p \leq n \text{ について } j_{Max} \end{cases}$$

および

$$\{1 \leq p < i_{Min} \text{ について } i_{Min},$$

50

$p = \{$   
 $\{ i_{Max} < p \text{ について } i_{Max}$   
 となるよう、  
 【数 5 2】

$$i_{Min} := \min \{i \in I\}$$

$$i_{Max} := \max \{i \in I\}$$

$$j_{Min} := \min \{j \in J\}$$

$$j_{Max} := \max \{j \in J\}$$

10

を用いて、 $(i, j, p)$  の自由に選択可能な構成要素を適合するために設置される、  
 請求項 9 に記載の装置。

【請求項 1 1】

内挿ユニットは、すべての  $i < p < j$  について隣接する  $i, j \in J$ 、つまり

【数 5 3】

$$p \notin J$$

20

に対して、

【数 5 4】

$$\alpha_p = \alpha_i + (p - i)/(j - i) \cdot (\alpha_j - \alpha_i)$$

を決定するために、および、それに応じて、すべての  $i < p < j$  について隣接する  $i, j \in I$ 、つまり

【数 5 5】

$$p \notin I$$

30

に対して、

【数 5 6】

$$\beta_p = \beta_i + (p - i)/(j - i) \cdot (\beta_j - \beta_i)$$

を決定するために設置される、請求項 10 に記載の装置。

【請求項 1 2】

姿勢の所与の点列をスプラインにより内挿するための内挿ユニットを有する、産業用ロボットなどのマニピュレータの方位誘導のための装置であって、方位は、 $i = 1, \dots, n$  について実数の合計  $R^3$  へ拡張されたオイラー角  $A_i, B_i, C_i \in R$  により表現される、装置。

40

【請求項 1 3】

内挿ユニットは、以下のステップ、つまり、

- 以下のステップによる方位  $(A_i, B_i, C_i)$  の表現

a) 標準オイラー角  $(A_i, B_i, C_i)$  の決定

b)  $I := \{i = 1, \dots, n \mid B_i \in \pi/2 + 2k\pi, k \in \mathbb{Z}\}$  および  $i \in I$  について

、

【数57】

$$(A_{i,1}(g), B_{i,1}(h), C_{i,1}(k))$$

$$= (A_i + 2g\pi, B_i + 2h\pi, C_i + 2k\pi), \quad g, h, k \in Z; \text{ および}$$

$$(A_{i,2}(l), B_{i,2}(m), C_{i,2}(o))$$

$$= (A_i + \pi + 2l\pi, \pi - B_i + 2m\pi, C_i + \pi + 2o\pi), \quad l, m, o \in Z;$$

の規定

10

c)  $J := \{ i = 1, \dots, n \mid B_i = \dots / 2 + 2k, \quad k \in Z \}$  および  $i \in J$  について

【数58】

$$(A_i(t), B_i(h), C_i(k, t))$$

$$= (A_i + t, B_i + 2h\pi, C_i + t + 2k\pi),$$

$$t \in R, \quad h, k \in Z;$$

の規定

20

d)  $L := \{ i = 1, \dots, n \mid B_i = \dots / 2 + 2k, \quad k \in Z \}$  および  $i \in L$  について、

【数59】

$$(A_i(t), B_i(h), C_i(k, t))$$

$$= (A_i + t, B_i + 2h\pi, C_i - t + 2k\pi),$$

$$t \in R, \quad h, k \in Z;$$

の規定

30

e)  $i \text{ Start}$   $I$  という条件でのランダム開始対  $(A_{i \text{ Start}}, B_{i \text{ Start}}, C_{i \text{ Start}})$  の選択

f)  $j = i \text{ Start}$  から離れたすべての  $j \in \{ 1, \dots, n \}$  について、ステップ  $g$  ) および  $h$  ) に従った拡張オイラー角  $(A_j, B_j, C_j)$  の決定

(ここで  $i \in \{ 1, \dots, n \}$  は近接指数であり、つまり  $i = j + 1$  または  $i = j - 1$  であり、加えて、 $i = i \text{ Start}$  または基準対  $(A_i, B_i, C_i)$  のいずれかは既にステップ  $g$  ) および  $h$  ) に従って適合されている)

g)  $j \in I$  について、 $g^*, h^*, k^*$  または  $l^*, m^*, o^*$  についての最小値を仮定して

【数60】

$$d_{j,1} = \min\{|A_{j,1}(g) - A_i| + |B_{j,1}(h) - B_i| +$$

$$|C_{j,1}(k) - C_i|, \quad g, h, k \in Z\};$$

$$d_{j,2} = \min\{|A_{j,2}(l) - A_i| + |B_{j,2}(m) - B_i| +$$

$$|C_{j,2}(o) - C_i|, \quad l, m, o \in Z\},$$

40

の決定、および

【数 6 1】

$$(A_j, B_j, C_j) = \begin{cases} (A_{j,1}(g^*), B_{j,1}(h^*), C_{j,1}(k^*)), \\ \quad d_{j,1} \leq d_{j,2} \text{ の場合} \\ \\ (A_{j,2}(l^*), B_{j,2}(m^*), C_{j,2}(o^*)), \\ \quad d_{j,1} > d_{j,2} \text{ の場合} \end{cases}$$

10

の選択

h) j, J または j, L について、h, k ∈ Z および t ∈ R を条件とした

【数 6 2】

$$dA_j(t) := |A_j(t) - A_i|$$

$$dB_j(h) := |B_j(h) - B_i|$$

$$dC_j(k, t) := |C_j(k, t) - C_i|$$

の規定；

20

【数 6 3】

$$dB_j(h^*) = \min\{dB_j(h), h \in Z\}$$

を条件とした、h\* ∈ Z の決定；

t に対する dA\_j(t) または dC\_j(k, t) のゼロ点の決定；

(ここで t\_{a\_{0,j}} は dA\_j(t) のゼロ点であり、t\_{c\_{0,j}}(k) は dC\_j(k, t) のゼロ点である)

ゼロ点の間隔が最小であるよう、つまり、

【数 6 4】

30

$$|t_{a_{0,j}} - t_{c_{0,j}}(k^*)| = \min\{|t_{a_{0,j}} - t_{c_{0,j}}(k)|, k \in Z\}$$

となるような k\* ∈ Z の選択；

t\_{a\_{0,j}} と t\_{c\_{0,j}}(k\*) との間の t\* ランダムの選択；および、

【数 6 5】

$$(A_j, B_j, C_j) = (A_j(t^*), B_j(h^*), C_j(k^*, t^*))$$

の選択

40

- 三重数 (A\_i, B\_i, C\_i) のスプラインによる内挿、および回転マトリックス R (A, B, C) における内挿関数の使用

の連続的な実行のために設置される、請求項 1 2 に記載の装置。

【請求項 1 4】

内挿ユニットは、t\* = 1/2 (t\_{a\_{0,j}} + t\_{c\_{0,j}}(k\*)) の選択のために設置される、請求項 1 3 に記載の装置。

【請求項 1 5】

内挿ユニットは、マニピュレータの位置および方位の別個のパラメータ化のために構成されている、請求項 9 ~ 1 4 のいずれかに記載の装置。

【請求項 1 6】

50

内挿ユニットは、一方では補助軸の動作の、他方ではマニピュレータの位置および/または方位の別個のパラメータ化のために構成されている、請求項9～15のいずれかに記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

発明の分野

この発明は、姿勢（位置および方位）の所与の点列のスプラインによる内挿を含む、産業用ロボットなどのマニピュレータの動作を制御するための方法、および、この発明に従った方法を実行するためにより特定の好適である装置に関する。

10

【背景技術】

【0002】

発明の背景

制御されたマニピュレータ、たとえば産業用ロボットの動作は一般に、多次元空間における予め設定された点列によって決定される。多軸の産業用ロボットの場合、これらの点の各々は、位置のデカルト座標と、三次元のユークリッド空間における方位に対する座標と、随意で補助軸の座標とを取り入れている。

【0003】

原則として、ロボット動作は厳密には予め定められておらず、その代わりに単に数々の固定点を有しており、それらは実行されるべき操作、たとえば加工物を取上げることおよび降ろすこと、障害物を回避することなどに基づいている。固定点は、対応する姿勢を開始し保持することによって、動作制御の目的のために用いられるロボット制御へ手動で教えられ、次に、実行されるロボット動作が適合されなければならない点列として利用可能となる。つまり、すべての固定点は、結果として生じる経路曲線を明確に規定する。

20

【0004】

点列の代わりに役に立つ機能説明を得るため、および、動きの全構成要素におけるロボット動作の連続性を可能とするために、点列は一般に内挿される。内挿により得られる点列の機能説明は数々の目的にかなう。第1に、データ量が圧縮され、第2に、点列に含まれない値に関する情報をたとえば外挿により得ることが可能である。最後に、より高い評価率が起こる。なぜなら、関数の評価はしばしば、表における参照よりも早く実施可能であるためである。

30

【0005】

前述の点列を内挿するための動作制御を工業的に実践する場合、特に得られる曲線の円滑さに関して特化された要求を満たすスプライン関数と、その一次導関数の連続性および微分可能性と、その二次導関数の連続性とがしばしば用いられる。経路曲線の一次および二次導関数は、曲線に沿って動かされる物体の速度または加速度で識別可能であるため、前記特徴は産業用ロボットの効率的な動作制御にとって非常に重要である。

【0006】

産業用ロボットのスプライン内挿を用いた動作制御のための公知の方法が、ホルシュ（Horsh）およびユットラー（Juttler）による論文（「コンピュータ支援設計（Computer-Aided Design）」、第30巻、217 - 224頁、1998年）に記載されている。ロボット動作の軌跡は、好適な指数または次数の多項式によって区分的に表現される。

40

【0007】

産業用ロボットのスプライン内挿による動作制御のためのその公知の方法では、方位、デカルト位置、およびおそらくは補助軸の位置への変更が大幅に異なる形で起こる（たとえば方位の大きな変更に対する最小限のデカルト変更）内挿されるべき点列の区分において、望ましくない不経済な動作経路が起こり得る、という欠点が判明している。特に、そのような場合、動作ループが起こり得る。つまり、ロボット動作の1つ以上の構成要素が後方および前方への非効率な動きを局所的に招く。なぜなら、点列のこの特定の区分における動作誘導は、動きの他の構成要素の著しい変更によって支配されるためである。また

50

、動きの個々の構成要素をその後著しく変更すること、たとえば強力な方位再設定をその後プログラミングすることが、動きの他の構成要素の挙動に影響を与える可能性があり、そのため、たとえば再設定の結果、経路のデカルト軌跡も変わって、それがユーザに受け入れられないということは、本質的に固定された動作経路にとって不利であると考えられる。

【 0 0 0 8 】

たとえばスプラインの形でのデカルト動作の方位誘導のため、四元数がしばしば用いられる。四元数とは、実数のスカラ部および複素数の3ベクトルとして表現可能な四重数の形の一般化複素数である。四元数は回転のマトリックス表現と密接に関連しており、したがって、コンピュータアニメーションでの方位誘導のために、およびロボット制御の目的のために好んで使用される。したがって、ロボット方位の点列は、四元数空間における四次元スプラインによって表現される。

10

【 0 0 0 9 】

これに関連して方位動作の最適で均一なパラメータ化を得るために、四元数空間におけるスプラインはできるだけ単位球の表面上にあるべきである。このようにしてのみ、単位球上の四元数スプラインの射影の均一なパラメータ化を達成することが可能である。なぜなら、四元数を回転マトリックスへ変換する際、各四元数は標準化されなければならないためである。単位球上への射影中の四次元の四元数スプラインの3自由度への減少(四元数スプラインまたは個々の四元数の標準化)を通して、標準化されたスプラインの歪んだパラメータ化という危険が生じ、それは次に、このように制御されるロボットの望ましくない動作挙動をもたらす可能性がある。

20

【 0 0 1 0 】

この公知のスプライン内挿方法には、しばしば運動パラメータ  $t$  と呼ばれ、時間座標に関連している共通のパラメータによる動作またはスプラインのパラメータ化が存在する(ホルシュおよびユットラー、221頁の左上を参照)。所与の点列  $P_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) について、パラメータ間隔  $[t_i, t_{i+1}]$  の長さは一般に、関連する点  $P_i, P_{i+1}$  の間隔に比例すると考えられる。前記間隔内に、デカルト距離と、方位へのおよび随意で補助軸への変更との双方が導入される。しかしながら、単一のパラメータのみによるパラメータ化は前述の欠点をもたらすということがわかっている。

【非特許文献1】ホルシュおよびユットラー、「コンピュータ支援設計」、第30巻、217 - 224頁、1998年

30

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 1 1 】

この発明の課題は、ループなどの望ましくない不経済な経路動作がないように前述の種類の方法および装置をさらに開発することである。加えて、動作または運動制御は、点から点への方位再設定が最小限となるように起こるべきである。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 2 】

発明の概要

前述の種類の方法の場合、設定された課題は、運動の構成要素が別個にパラメータ化されるという理由で、この発明によって解決される。前述の種類の方法では、内挿中の運動の構成要素の別個のパラメータ化のために構成された内挿装置をそれが有しているという理由で、設定された課題が解決される。

40

【 0 0 1 3 】

この発明によれば、たとえばデカルト位置および方位など互いに影響を及ぼしてはならない  $P_i$  の全構成要素の別個のパラメータ化を介して、前述の欠点が回避される。

【 0 0 1 4 】

この発明のさらなる展開によれば、マニピュレータのデカルト位置は、関連する方位とは別個にパラメータ化されるかまたはパラメータ化可能である。

50

## 【 0 0 1 5 】

制御すべきマニピュレータが補助軸を有する場合、この発明のさらなる展開によれば、補助軸の動作は、マニピュレータの位置および/または方位とは別個にパラメータ化されるかまたはパラメータ化可能である。

## 【 0 0 1 6 】

空間での回転動作の説明における四元数の公知の好適な特徴を利用するため、この発明の好ましい展開によれば、方位誘導は四元数  $(q_i, i = 1, \dots, n)$  により起こり、この発明に従った装置はそのような方位誘導のために設置される。

## 【 0 0 1 7 】

また、これに代えて、この発明のさらなる展開によれば、方位誘導はオイラー角  $A_i, B_i, C_i (i = 1, \dots, n)$  を用いた連続した回転により起こり、この発明に従った装置はそのような方位誘導のために設置され、各場合において、直接連続する回転が互いに垂直な軸のまわりで起こる。

10

## 【 0 0 1 8 】

好ましくは、これに関連して、 $A_i, B_i, C_i, R (R: \text{実数の量})$  の延長された、または拡張されたオイラー角が用いられる。

## 【発明の効果】

## 【 0 0 1 9 】

このように、この発明によれば、方位の均一なパラメータ化が常に確実とされ、その表現のために3自由度しか必要とされない。これに関連して、標準オイラー角はこの発明により合計  $R^3$  へ拡張され、それは最小限の方位再設定を確実にする。驚くべきことに、オイラー角の規定範囲の制限を解除することによってはるかにより経済的な動作経路が決定可能であることがわかっている。

20

## 【 0 0 2 0 】

この発明のさらなる利点および特徴は、特許請求の範囲から、および次に続く添付図面に関する特定の実施例の説明から収集可能である。

## 【発明を実施するための最良の形態】

## 【 0 0 2 1 】

## 図面の詳細な説明

簡略化された二次元的表現において、図1 aは、産業用ロボットの運動についてのデカルト運動軌跡  $B$  を示す。2つのデカルト座標  $x(t), y(t)$  を見ることができ、それらは共通のパラメータ  $t$  に依存しており、それは一般に時間座標に関連している。Sで経路軌跡  $B$  はループを有する。つまり、パラメータ  $t$  の関連する間隔にわたって、ロボットは、 $x$  および/または  $y$  方向において、一般に不経済なために望ましくない前方および後方への動作を行なうが、それは実際には回避されるべきである。曲線  $B$  は、多次元空間におけるロボット動作の経路を与える点  $P_i$  の予め定められた列を内挿する。点  $P_i$  は動作制御を担当するロボット制御へ教えられることが可能であり、または、これは操縦プロセス中にたとえばセンサ情報などからオンラインで得られる。ロボット動作中に  $P_i$  を内挿するため、標準スプラインが用いられる(ホルシュおよびユットラー、上記引用文中)。以下、

30

40

## 【 0 0 2 2 】

## 【数1】

$$P_i = (X_i, Y_i, Z_i, A_i, B_i, C_i, E_1, \dots, E_m) \in R^{6+m}, i=1, \dots, n$$

## 【 0 0 2 3 】

は  $(m$  個の補助軸  $E_1 \sim E_m$  を有する  $6$  軸ロボットについて) 内挿されるべきロボット位置である。このため、求められるものは、所望の軌跡のスプライン  $S_p$  のパラメータ化、つまり、

$$\text{すべての } i = 1, \dots, n \text{ および } t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_n \text{ について } S_p(t_i) = P_i$$

50

であり、それは最適な円滑曲線をもたらす。好ましい軌跡を得るため、パラメータ化間隔  $[t_i, t_{i+1}]$  の長さは一般に、関連する点  $P_i, P_{i+1}$  の間隔に比例して選択される。前記間隔内に、デカルト距離と、方位変更およびおそらくは補助軸の変更との双方が導入されなければならない。この手順は望ましくないループを回避するために意図されている。

【0024】

スプラインは一般に、接合点での多項式の選択可能な特徴（たとえば、三次または三乗関数を有する三乗スプライン内挿の場合、一次導関数および/または連続的な二次導関数の連続性と微分可能性）を有する断片的な多項式内挿である。

【0025】

図1aにおいて、方位、デカルト位置およびおそらくは補助軸への修正が大幅に異なる（たとえば大きな方位変更を同時に有する最小限のデカルト修正）区分  $[P_i, P_{i+1}]$  で示されるように、単一のパラメータ  $t$  を用いたパラメータ化は、方位誘導およびデカルト位置にとって同時には好適でない長さのパラメータ間隔  $[t_i, t_{i+1}]$  をもたらし得る。そのような場合、ループは依然として起こり得る（図1a）。

10

【0026】

その後プログラムされ、マークされた方位の再設定も、共通パラメータ間隔  $[t_i, t_{i+1}]$  を変更、たとえば延長して、デカルト軌跡を変更することができるが、それは実際には受け入れられない。

【0027】

「教えられた」デカルト位置  $(X, Y, Z)$  に加え、点  $P_i$  の所与の列を単一の連続する曲線を介して内挿する場合、（たとえばオイラー角  $(A, B, C)$  および対応する補助軸位置  $(E_1, E_2, \dots)$  により表現される）方位も内挿され、同時に、点から点への方位再設定が最小限に抑えられる。加えて、方位への単なる変更がデカルト曲線または補助軸軌跡を修正してはならず、逆もまた同様である。このため、この発明は、互いに影響を及ぼすことができない  $P_i$  の全構成要素の別個のパラメータ化を提案している。たとえば、デカルト位置、方位（オイラー角または四元数の説明から独立して）および異なる補助軸を別個にパラメータ化することが可能であり、たとえば以下のようなものである。

20

【0028】

【数2】

$$\begin{aligned} \text{Kar}(t_i) &:= (X_i, Y_i, Z_i), \quad i=1, \dots, n; \quad t_i \in \mathbb{R}, \quad t_1 < t_2 < \dots < t_n \\ \text{Orio}(o_i) &:= (A_i, B_i, C_i), \quad i=1, \dots, n; \quad o_i \in \mathbb{R}, \quad o_1 < o_2 < \dots < o_n \\ \text{Ek}(e_i) &:= \text{Ek}_i, \quad i=1, \dots, n, \quad k=1, \dots, m; \quad e_{k_1} \in \mathbb{R}, \quad e_{k_1} \\ &< e_{k_2} < \dots < e_{k_n}. \end{aligned}$$

30

【0029】

単調に増加する中間パラメータ化

すべての  $i = 1, \dots, n$  について  $o(t_i) = o_i$  を満たす  $o(t)$

すべての  $i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m$  について  $e_k(t_i) = e_{k_i}$  を満たす  $e_k(t)$

40

を介して所望の内挿特性が保証され、図1bに示す軌跡が得られて、以下の所望の要件を満たす。

【0030】

【数3】

$$\begin{aligned} \text{Sp}(t) &= (\text{Kar}(t), \text{Orio}(o(t)), \text{E}=(e=(t)), \\ &\dots, \text{Em}(em(t))). \end{aligned}$$

50

## 【0031】

所与の次数の微分可能性のために中間パラメータ化の単調さを維持するために、たとえば内挿スプラインを利用することが可能であり、それらは、スプラインが関連する多角形の進路に近接してランダムに強制され得るさらなるパラメータを含んでいる（たとえば、ヘルムート・スパス（Helmuth Spath）、『スプラインアルゴリズム（Spline Algorithms）』、第4版、R. オルデンプルグ出版社（R. Oldenbourg Verlag）、1986年、「一般化三乗スプライン関数（Generalized Cubic Spline Functions）」を参照）。

## 【0032】

1つの点での単なる方位変更はしたがって、方位のパラメータ化または中間パラメータ化のみを変更するが、デカルト経路または補助軸のそれを変更することはない。

10

## 【0033】

方位誘導は、四元数またはオイラー角を用いて起こり得る。

## 【0034】

1. 四元数を用いた方位誘導

空間における各方位再設定は、好適なベクトル  $v \in R^3$  ( $|v| = 1$  という条件で) および角度  $\varphi$  についての回転によって表現され得る。この対 (ベクトル, 角度) と関連する四元数  $q$  との間には、以下の関連が存在する。

## 【0035】

## 【数4】

$$\begin{aligned} q &= (w, x, y, z) \\ &= (\cos(1/2\varphi), \sin(1/2\varphi) \cdot v) \\ &= (\cos(-1/2\varphi), \sin(-1/2\varphi) \cdot (-v)) \end{aligned}$$

20

## 【0036】

このため、 $-v$  による  $\varphi$  の回転は、同じ方位に至るだけでなく、同じ四元数にも至る。

## 【0037】

しかしながら、 $v$  による反対方向、つまり  $-\varphi$  (  $2\pi - \varphi$  ) の回転も当然同じ方位に至るが、関連する四元数として  $-q$  が得られる (符号は回転方向に関する情報を含む)。対 (回転ベクトル, 角度) と関連する四元数との間には、以下の関連がしたがって存在する。

30

## 【0038】

## 【数5】

$$\begin{aligned} q &\Leftrightarrow (v, \varphi), (-v, -\varphi) \\ -q &\Leftrightarrow (v, -(2\pi - \varphi)), (-v, 2\pi - \varphi). \end{aligned}$$

## 【0039】

単位四元数  $q = (\pm 1, 0, 0, 0)$  について  $\varphi = 0$  または  $2\pi$ 、および  $\sin(1/2\varphi) = 0$  であるため、ベクトル  $v$  はランダムに選択可能である。単位円上の残りの四元数すべてについて、 $\cos(1/2\varphi) = 0$  または  $\sin(1/2\varphi) = 0$  という条件で2つの対  $(v, \varphi)$ 、 $(-v, -\varphi)$  を決定することが常に可能である。

40

## 【0040】

方位マトリックスへ変換する際、四元数は標準化される。つまり、ゼロとは異なる或る四元数の正の倍数すべてが、同じ方位マトリックスおよび回転方向に至る。

## 【0041】

四元数空間における単位球の表面上に常に配置され、そこで方位スプラインの次元が一次元分 (4 から 3 へ) 減少される四元数スプラインによって絶対的に均一にパラメータ化

50

された方位制御を発見するために、この発明は、スプラインの決定のために連続して以下のステップを行なうことを提案している（以下、 $N$ は自然数の量を示し、 $Z$ は整数の量を示す）。

【0042】

-

【0043】

【数6】

$$v(\alpha, \beta) = (\cos(\alpha) \cos(\beta), \sin(\alpha) \cos(\beta), \sin(\beta))$$

10

【0044】

という条件で

【0045】

【数7】

$$q(\alpha, \beta, \varphi) = (\cos \frac{1}{2} \varphi, \sin(\frac{1}{2} \varphi) \cdot v(\alpha, \beta))$$

【0046】

に従った四次元単位球上の各四元数の表現

ここで、 $(\alpha, \beta, \varphi)$ （および $r = 1$ ）は回転ベクトル $v = v(\alpha, \beta)$ の球座標を与える。

20

【0047】

- 以下のステップによる運動最適対 $(v_i, \varphi_i)$ の決定

a) すべての $i = 1, \dots, n - 1$ について $q_i \cdot q_{i+1} = 0$ となるような $q_i$ の符号の適合

b) すべての $i = 1, \dots, n$ について、

【0048】

【数8】

$$q_i = (\cos(\frac{1}{2}\varphi_i), \sin(\frac{1}{2}\varphi_i) v_i)$$

【0049】

という条件での可能な対 $(v_i, \varphi_i)$ の決定

c)

【0050】

【数9】

$$iStart \in I := \{i=1, \dots, n \mid q_i \neq (\pm 1, 0, 0, 0)\}, \text{ たとえば}$$

$$iStart = \min\{i \in I\}$$

30

【0051】

という条件でのランダム開始対 $(v_{iStart}, \varphi_{iStart})$ の選択

40

【0052】

【数10】

$$iStart \notin I$$

【0053】

を選択する場合、完全に自由に選択可能な回転ベクトル $v_{iStart}$ は不必要に固定され、それは次善の方位に至り得る。なぜなら開始対はそれ自体もはや適合されないためである。

【0054】

50

d)  $j = i \text{ Start}$ を除くすべての  $j \in \{1, \dots, n\}$  について、ステップ e) ~ g) に従った基準対  $(v_i, \varphi_i)$  から始まる 1 つの対  $(v_j, \varphi_j)$  の各場合での正確な決定  
ここで  $i \in \{1, \dots, n\}$  は隣接指数であり、つまり  $i = j + 1$  または  $i = j - 1$  である。また、 $i = i \text{ Start}$  または基準対のいずれかは既にステップ e) ~ g) に従って適合されている。

【0055】

e)

【0056】

【数11】

$$\begin{aligned} |\varphi_{j,1}(k^*) - \varphi_i| &= \min\{|\varphi_{j,1}(k) - \varphi_i|, k \in \mathbb{Z}\} \\ &= \min\{|\varphi_j + 4k\pi - \varphi_i|, k \in \mathbb{Z}\}, \\ |\varphi_{j,2}(h^*) - \varphi_i| &= \min\{|\varphi_{j,2}(h) - \varphi_i|, h \in \mathbb{Z}\} \\ &= \min\{|\varphi_j - \varphi_i + 4h\pi - \varphi_i|, h \in \mathbb{Z}\} \end{aligned}$$

10

【0057】

となるような、 $k^*, h^* \in \mathbb{Z}$  の決定

f) 次に  $j \in I$  について、

【0058】

【数12】

$$\begin{aligned} d_{j,1} &= |\arccos(v_i^T v_j)| + |\varphi_{j,1}(k^*) - \varphi_i|, \\ d_{j,2} &= |\arccos(v_i^T (-v_j))| + |\varphi_{j,2}(h^*) - \varphi_i| \end{aligned}$$

20

【0059】

の決定、または  $j \in I$  について

【0060】

【数13】

$$\begin{aligned} d_{j,1} &= |\varphi_{j,1}(k^*) - \varphi_i|, \\ d_{j,2} &= |\varphi_{j,2}(h^*) - \varphi_i| \end{aligned}$$

30

【0061】

の決定

g) 次に各場合における  $(v_j, \varphi_j)$  の選択

ここで

【0062】

【数14】

$$j \notin I$$

40

【0063】

について

【0064】

【数 1 5】

$$\begin{aligned}
 & \{ (v_j, \varphi_{j,1}(k^*)), d_{j,1} \leq d_{j,2} \\
 (v_j, \varphi_j) = & \{ \\
 & \{ (-v_j, \varphi_{j,2}(h^*)), d_{j,1} > d_{j,2}
 \end{aligned}$$

【 0 0 6 5】

または

【 0 0 6 6】

10

【数 1 6】

$$j \notin I$$

【 0 0 6 7】

について

【 0 0 6 8】

【数 1 7】

$$\begin{aligned}
 & \{ (v_i, \varphi_{j,1}(k^*)) \quad d_{j,1} \leq d_{j,2} \text{ の場合} \\
 (v_j, \varphi_j) = & \{ \\
 & \{ (v_i, \varphi_{j,2}(h^*)) \quad d_{j,1} > d_{j,2} \text{ の場合}
 \end{aligned}$$

20

【 0 0 6 9】

である。

【 0 0 7 0】

$v_j$  は原則として、

【 0 0 7 1】

【数 1 8】

30

$$j \notin I$$

【 0 0 7 2】

についてランダムに選択可能である。特定の選択 ( $v_j = v_i$ ) は (すべての ( $v_j, \varphi_j$ ) が適合されるまで) 単に暫定的であり、ステップ d) で完全な基準対が常に存在すること、および、完全に選択可能な回転ベクトルが無視される (つまり飛ばされる) ことを保証する。そのため最終的には、自由には選択できない隣接する回転ベクトル間の間隔の最小化が常に存在する。

【 0 0 7 3】

40

すべての対 ( $v_i, \varphi_i$ ) がステップ e) ~ g) に従って適合されると、自由に選択可能な  $v_i$  ( $i \in I$  という条件で) はもはや必要とされず、削除または取消しできる。

【 0 0 7 4】

- 以下のステップによる球座標表現における  $v_i$  からの対 ( $\alpha_i, \beta_i$ ) の決定  
 h) すべての  $i \in I$  について、 $v_i$  の標準球座標 ( $\alpha_i, \beta_i$ ) の決定

【 0 0 7 5】

【数 1 9】

$$v_i = (\cos(\alpha_i) \cos(\beta_i), \sin(\alpha_i) \cos(\beta_i), \sin(\beta_i))$$

50

【0076】

i)  $J := \{v_j \mid (0, 0, \pm 1) \text{ の条件で } j \in I\}$ ,  
 $L := \{v_j \mid (0, 0, \pm 1) \text{ の条件で } j \in I\}$  の規定、およびしたがって  $R \times R$  からの拡張球座標の規定  
 -  $i \in J$  について

【0077】

【数20】

$$(\alpha_{i,1}(h), \beta_{i,1}(k)) = (\alpha_i + 2h\pi, \beta_i + 2k\pi),$$

$$h, k \in Z; \quad 10$$

$$(\alpha_{i,2}(l), \beta_{i,2}(m)) = (\alpha_i + \pi + 2l\pi, \pi - \beta_i + 2m\pi),$$

$$l, m \in Z$$

【0078】

-  $i \in L$  について

【0079】

【数21】

$$(\alpha_i(x), \beta_i(k)) = (x, \beta_i + 2k\pi),$$

$$x \in R, k \in Z \quad 20$$

【0080】

( $i \in L$  について  $i = \pm 1/2$  であるため、 $(\alpha_i(x) + \dots, \beta_i(k))$  はさらなる解を提供しない。)

j)  $j \in J$ 、たとえば  $j \in J$  などの条件でのランダム開始対  $(i_{start}, j_{start})$  の固定

( $j \in L$  は好ましくない。なぜなら、自由に選択可能なパラメータ  $j$  はその場合前もって固定されており、それは次善の解をもたらすためである。)

k) 各場合において  $j = j_{start}$  を除くすべての  $j \in I$  について、ステップ 1) および m) に従った拡張極座標の決定

ここで  $i \in I$  は  $j$  の近接指数であり、そのため  $i$  と  $j$  との間には  $k \in I$  はない。また、 $i = j_{start}$  または基準対  $(i, j)$  のいずれかは既にステップ 1) および m) に従って適合されている。

【0081】

1)

【0082】

【数22】

$$d_{j,1} = \min \{ |\alpha_{j,1}(h) - \alpha_i| + |\beta_{j,1}(k) - \beta_i|, \\ \text{ここで } h, k \in Z \}$$

$$= |\alpha_{j,1}(h^*) - \alpha_i| + |\beta_{j,1}(k^*) - \beta_i|;$$

$$d_{j,2} = \min \{ |\alpha_{j,2}(l) - \alpha_i| + |\beta_{j,2}(m) - \beta_i|, \\ \text{ここで } l, m \in Z \}$$

$$= |\alpha_{j,2}(l^*) - \alpha_i| + |\beta_{j,2}(m^*) - \beta_i|$$

【 0 0 8 3 】

という条件の下での値  $h^*$ ,  $k^*$ ,  $l^*$ ,  $m^*$   $Z$  の  $j$   $J$  の決定、または

【 0 0 8 4 】

【 数 2 3 】

$$|\beta_j(k^*) - \beta_i| = \min\{|\beta_j(k) - \beta_i|, k \in Z\}$$

【 0 0 8 5 】

という条件の下での値  $k^*$   $Z$  の  $j$   $L$  についての決定

m) 次に  $(j, j)$  の選択

ここで  $j$   $J$  について

【 0 0 8 6 】

【 数 2 4 】

$$\{(\alpha_{j,1}(h^*), \beta_{j,1}(k^*)) \mid d_{j,1} \leq d_{j,2}\}$$

$$(\alpha_j, \beta_j) = \{$$

$$\{(\alpha_{j,2}(l^*), \beta_{j,2}(m^*)) \mid d_{j,1} > d_{j,2}\}$$

【 0 0 8 7 】

または  $j$   $L$  について

【 0 0 8 8 】

【 数 2 5 】

$$(\alpha_j, \beta_j) = (\alpha_i, \beta_j(k^*))$$

【 0 0 8 9 】

である。  $j$   $L$  について、  $j$  は原則としてランダムに選択可能である。

【 0 0 9 0 】

特定の選択  $(j = j)$  は (すべての  $(j, j)$  が適合されるまで) 単に暫定的であり、ステップ 1) で完全な基準対が常に存在すること、および、自由に選択可能な角度が無視される (つまり飛ばされる) ことを保証しており、そのため或る角度から次の (隣接する) 自由には選択できない角度への間隔が最小限に抑えられる。

【 0 0 9 1 】

すべての対  $(j, j)$  がステップ 1) および m) に従って適合されると、自由に選択可能な  $j$  ( $j$   $L$  という条件で) はもはや必要とされず、削除可能である。

【 0 0 9 2 】

n) ステップ a) ~ m) に従って決定された三重数の数の選択

$$\{i \mid J \text{ について } (i, i, i)\}$$

$$(i, i, i) = \{i \mid L \text{ について } (i^*, i, i)\}$$

$$\{i \mid I \text{ について } (i^*, i^*, i)\}$$

ここで  $i^*$  で示された構成要素はランダムに選択可能である。

【 0 0 9 3 】

o) 三重数  $(i, i, i)$  における選択可能な構成要素の適合

- ステップ n) において選択された三重数  $(i, i, i)$  のスプラインによる内挿および

-  $q(i, i, i)$  における内挿関数の使用

このように決定されたロボット動作のための内挿された経路曲線は、空間における方位などの運動の個々の構成要素への変更がその後起こった場合でも、図 1 a に示す望ましくないループ形成をより特定の回避する。なぜなら、そのような運動の構成要素は、この

10

20

30

40

50

発明によれば、各場合においてそれら独自のパラメータ化を有しており、それは運動の他の構成要素へ否定的な影響を全く与えることなく適合可能であるためである。

【0094】

( $i, j, p$ ) の自由に選択可能な構成要素の適合は、上述のアルゴリズムのさらなる展開に従い、

$$p = \begin{cases} \{1 < p < j_{Min} \text{ について } j_{Min}, \\ \{j_{Max} < p < n \text{ について } j_{Max} \end{cases}$$

および

$$p = \begin{cases} \{1 < p < i_{Min} \text{ について } i_{Min}, \\ \{i_{Max} < p < n \text{ について } i_{Max} \end{cases}$$

となるよう、

【0095】

【数26】

$$i_{Min} := \min \{i \in I\}$$

$$i_{Max} := \max \{i \in I\}$$

$$j_{Min} := \min \{j \in J\}$$

$$j_{Max} := \max \{j \in J\}$$

10

20

【0096】

を用いて起こる。

【0097】

すべての  $i < p < j$  について隣接する  $i, j \in J$ 、つまり  $p \in J$  に対して、

【0098】

【数27】

$$\alpha_p = \alpha_i + (p - i) / (j - i) \cdot (\alpha_j - \alpha_i)$$

30

【0099】

を選択し、それに応じて、すべての  $i < p < j$  について隣接する  $i, j \in I$ 、つまり  $p \in I$  に対して、

【0100】

【数28】

$$\beta_p = \beta_i + (p - i) / (j - i) \cdot (\beta_j - \beta_i)$$

40

【0101】

を選択することも可能である。

【0102】

この発明に従った四元数に基づく運動制御を、以下の表1に、およびフローチャートによる図5に簡潔に示す。

【0103】

【表1】

表1：四元数アルゴリズム

作用	回転ベクトルおよび角度で 方位を計算する					
四元数適合 符号を計算する	$q_1$	$q_2 = (1, 0, 0, 0)$	$q_3$	...	$q_{n-1}$	$q_n = (-1, 0, 0, 0)$
回転ベクトル/ 角度を計算する	$(\bar{v}_1, \bar{\varphi}_1)$	$(\bar{v}_2, \bar{\varphi}_2)$ ここで $\bar{v}_2 = \bar{v}_1$	$(\bar{v}_3, \bar{\varphi}_3)$	...	$(\bar{v}_{n-1}, \bar{\varphi}_{n-1})$	$(\bar{v}_n, \bar{\varphi}_n)$ ここで $\bar{v}_n = \bar{v}_{n-1}$
対稱土間の変化 最小限にする	$(v_1, \varphi_1)$	$(v_2, \varphi_2)$	$(v_3, \varphi_3)$	...	$(v_{n-1}, \varphi_{n-1})$	$(v_n, \varphi_n)$
自由に選択可能な $v_i$ を削除する	$(v_1, \varphi_1)$	$(*, \varphi_2)$	$(v_3, \varphi_3)$	...	$(v_{n-1}, \varphi_{n-1})$	$(*, \varphi_n)$

10

作用	回転ベクトルについての拡張極座標を計算する					
回転ベクトルを 考慮する	$v_1 = (0, 0, -1)$	*	$v_3$	...	$v_{n-1} = (0, 0, 1)$	*
極座標を 計算する	$(\bar{\alpha}_1, \bar{\beta}_1)$ ここで $\bar{\alpha}_1 = \bar{\alpha}_3$	$(*, *)$	$(\bar{\alpha}_3, \bar{\beta}_3)$	...	$(\bar{\alpha}_{n-1}, \bar{\beta}_{n-1})$ ここで $\bar{\alpha}_{n-1} = \bar{\alpha}_{n-2}$	$(*, *)$
拡張極座標を 計算する	$(\alpha_1, \beta_1)$	$(*, *)$	$(\alpha_3, \beta_3)$	...	$(\alpha_{n-1}, \beta_{n-1})$	$(*, *)$
自由に選択可能な $\alpha_i$ を削除する	$(*, \beta_1)$	$(*, *)$	$(\alpha_3, \beta_3)$	...	$(*, \beta_{n-1})$	$(*, *)$

20

30

作用	「四元数-極座標」で 方位を表現する					
三次元スライムを 計算する	$(*, \beta_1, \varphi_1)$	$(*, *, \varphi_2)$	$(\alpha_3, \beta_3, \varphi_3)$	...	$(*, \beta_{n-1}, \varphi_{n-1})$	$(*, *, \varphi_n)$

【0104】

40

2. オイラー角を用いた方位制御または誘導

定義により「古典的な」オイラー角は  $[-, ] \times [- / 2, / 2] \times [-, ]$  という  $R^3$  の一部に制限されているものの、この発明によれば、すべてのオイラー角制限は撤回される。 $R \times R \times R (R^3)$  からの「拡張オイラー角」を用いた方位表現の可能な変形すべての中で、最小限の方位再設定につながるものが求められる。

【0105】

各場合において合同で回転されるシステムにおける軸のまわりを回転する角度 A、B および C による 3 つの回転を連続して行なう場合、前記角度はオイラー角として言及される。回転がそのまわりで起こる軸の順序とは独立して、各方位について 12 の異なる種類のオイラー角、たとえば X - Y - Z オイラー角、X - Y - X オイラー角などがある。

50

## 【0106】

A、BおよびCがたとえばZ-Y-Xオイラー角である場合、総回転Rは以下の式から得られる。

## 【0107】

## 【数29】

$$R = \text{rot}(z, A) \cdot \text{Rot}(y, B) \cdot \text{Rot}(x, C)$$

## 【0108】

ここで  $\text{Rot}(v, \theta)$  は、 $v$  についての角度  $\theta$  の回転を示す。

10

## 【0109】

以下の考察はオイラー角全種類へ移すことができる。このため、無制限に、Z-Y-Xオイラー角への限定があり得る。この場合、目標方位は以下の理由により開始方位（基準システムI）から得られる。

## 【0110】

- 基準システムIでは、回転はZ軸のまわりでA起こる（結果：基準システムI'）。

## 【0111】

- ダッシュが1つついた基準システムI'では、回転はy軸のまわりでB起こる（結果：基準システムI''）。

## 【0112】

- ダッシュが2つついた基準システムI''では、回転はx軸のまわりでC起こる（結果：目標方位R）。

20

## 【0113】

これは図2aにおいて、Z-Y-Xオイラー角について例示的に示されている。はじめに、基準システムIはZ軸のまわりでの  $A = \pi/4$  の回転（正の反時計回りの回転方向）によって変換され、基準システムI'へ変換される。その後、新しく規定されたy軸のまわりでの  $B = \pi/3$  の回転により、基準システムI'は新しい基準システムI''へ変換される。最後に、軸xのまわりでの  $C = \pi/4$  の回転により、これは所望の目標方位となる。

## 【0114】

基準システムI'のx軸のみを考慮すると（または目標方位の場合）、角度AおよびBは、開始方位に対するそれらの球座標を明確に表わす。角度対  $(A + \pi/4, \pi/3 - B)$  で同じx'が得られる。

30

## 【0115】

しかしながら、この場合、y'およびz'は、 $(A, B, C)$  での場合に対して角度分回転される。このため、オイラー角  $(A + \pi/4, \pi/3 - B, C + \pi/4)$  を用いた場合、同じ目標方位が得られる。このため、前述の例では、 $(\pi/4, \pi/3, \pi/4)$  の代わりに三重数  $(5/4, 2/3, 5/4)$  となる。これを図2b)に示す。

## 【0116】

この発明によれば、そのようなオイラー角適合は、最小限の方位再設定のために連続して以下のステップが行なわれ、一般的な性質の制限なく、オイラー角A, B, Cが瞬間的なz軸、y軸またはx軸のまわりでの回転を示すために引起こされる。

40

## 【0117】

- 以下のステップによる方位  $(A_i, B_i, C_i)$  の表現

a) 標準オイラー角  $(A_i, B_i, C_i)$  の決定

b)  $I := \{ i = 1, \dots, n \mid B_i \pm \pi/2 + 2k\pi, k \in \mathbb{Z} \}$  および  $i \in I$  について、

て、

## 【0118】

## 【数30】

$$\begin{aligned}
 & (A_{i,1}(g), B_{i,1}(h), C_{i,1}(k)) \\
 & = (A_i + 2g\pi, B_i + 2h\pi, C_i + 2k\pi), \\
 & \quad g, h, k \in \mathbb{Z}; \text{ および} \\
 & (A_{i,2}(l), B_{i,2}(m), C_{i,2}(o)) \\
 & = (A_i + \pi + 2l\pi, \pi - B_i + 2m\pi, C_i + \pi + 2o\pi), \\
 & \quad l, m, o \in \mathbb{Z}
 \end{aligned}$$

10

## 【0119】

の規定

c)  $J := \{ i = 1, \dots, n \mid B_i = \pi/2 + 2k\pi, k \in \mathbb{Z} \}$  および  $i \in J$  について

## 【0120】

## 【数31】

$$\begin{aligned}
 & (A_i(t), B_i(h), C_i(k, t)) \\
 & = (A_i + t, B_i + 2h\pi, C_i + t + 2k\pi), \\
 & \quad t \in \mathbb{R}, h, k \in \mathbb{Z}
 \end{aligned}$$

20

## 【0121】

の規定

(  $i \in J$  について、代替的な表現  $(A_i(t) + \pi, \pi - B_i(h), C_i(k, t) + \pi)$  は新しい解を提供しない。 )

d)  $L := \{ i = 1, \dots, n \mid B_i = \pi/2 + 2k\pi, k \in \mathbb{Z} \}$  および  $i \in L$  について、

## 【0122】

## 【数32】

$$\begin{aligned}
 & (A_i(t), B_i(h), C_i(k, t)) \\
 & = (A_i + t, B_i + 2h\pi, C_i - t + 2k\pi), \\
 & \quad t \in \mathbb{R}, h, k \in \mathbb{Z}
 \end{aligned}$$

30

## 【0123】

の規定

(  $i \in L$  について、 $(A_i(t) + \pi, \pi - B_i(h), C_i(k, t) + \pi)$  という表現は新しい解を提供しない。 )

e)  $i_{\text{start}} \in I$ 、たとえば  $i_{\text{start}} = \min \{ i \in I \}$  という条件でのランダム開始対  $(A_{i_{\text{start}}}, B_{i_{\text{start}}}, C_{i_{\text{start}}})$  の選択

$i_{\text{start}} \in J \setminus L$  は次善の方位制御を与えるであろう。なぜなら、開始対はそれ自体もはや適合されず、したがって  $i_{\text{start}} \in J \setminus L$  について自由に選択可能なパラメータ  $t$  は固定された形で予め定められなければならないからである。

## 【0124】

f)  $j = i_{\text{start}}$  から離れたすべての  $j \in \{ 1, \dots, n \}$  について、ステップ  $g$  ) および  $h$  ) に従った拡張オイラー角  $(A_j, B_j, C_j)$  の決定

ここで  $i \in \{ 1, \dots, n \}$  は近接指数であり、つまり  $i = j + 1$  または  $i = j - 1$  であ

50

り、加えて  $i = i \text{ start}$  または基準対  $(A_i, B_i, C_i)$  のいずれかは既にステップ  $g)$  および  $h)$  に従って適合されている。

【0125】

$g) j \in I$  について、 $g^*, h^*, k^*$  または  $l^*, m^*, o^*$  についての最小値を仮定して

【0126】

【数33】

$$d_{j,1} = \min\{|A_{j,1}(g) - A_i| + |B_{j,1}(h) - B_i| + |C_{j,1}(k) - C_i|, \\ g, h, k \in Z\};$$

$$d_{j,2} = \min\{|A_{j,2}(l) - A_i| + |B_{j,2}(m) - B_i| + |C_{j,2}(o) - C_i|, \\ l, m, o \in Z\};$$

10

【0127】

の決定、および

【0128】

【数34】

$$(A_j, B_j, C_j) = \begin{cases} (A_{j,1}(g^*), B_{j,1}(h^*), C_{j,1}(k^*)), \\ \{d_{j1} \leq d_{j2} \text{ の場合} \\ (A_{j,2}(l^*), B_{j,2}(m^*), C_{j,2}(o^*)), \\ \{d_{j1} > d_{j2} \text{ の場合} \end{cases}$$

20

【0129】

の選択

$h) j \in J$  または  $j \in L$  について、 $h, k \in Z$  および  $t \in R$  を条件とした

【0130】

【数35】

$$dA_j(t) := |A_j(t) - A_i|$$

$$dB_j(h) := |B_j(h) - B_i|$$

$$dC_j(k, t) := |C_j(k, t) - C_i|$$

30

【0131】

の規定;

【0132】

【数36】

$$dB_j(h^*) = \min\{dB_j(h), h \in Z\}$$

40

【0133】

を条件とした、 $h^* \in Z$  の決定;

$t$  に対する  $dA_j(t)$  または  $dC_j(k, t)$  のゼロ点の計算;

ここで  $t_{a_{0,j}}$  は  $dA_j(t)$  のゼロ点であり、 $t_{c_{0,j}}(k)$  はパラメータ  $k$  に依存する  $dC_j(k, t)$  のゼロ点である。

【0134】

50

ゼロ点の最小間隔が存在するよう、つまり、

【 0 1 3 5 】

【数 3 7】

$$|ta_{0,j} - tc_{0,j}(k^*)| = \min\{|ta_{0,j} - tc_{0,j}(k)|, k \in Z\}$$

【 0 1 3 6 】

となるような  $k^* \in Z$  の選択；

$ta_{0,j}$  と  $tc_{0,j}(k^*)$  との間の  $t^*$  ランダム の選択；

なぜならそこには

10

【 0 1 3 7 】

【数 3 8】

$$\begin{aligned} & dA_j(t^*) + dB_j(h^*) + dC_j(k^*, t^*) \\ & = \min \{dA_j(t) + dB_j(h) + dC_j(k, t), \\ & t \in R, h, k \in Z\} \end{aligned}$$

【 0 1 3 8 】

の実行が常にあるためである。および、

20

【 0 1 3 9 】

【数 3 9】

$$(A_j, B_j, C_j) = (A_j(t^*), B_j(h^*), C_j(k^*, t^*))$$

【 0 1 4 0 】

の選択

- 三重数  $(A_i, B_i, C_i)$  のスプラインによる内挿、および回転マトリックス  $R(A, B, C)$  における内挿関数の使用

上述のアルゴリズムの好ましい展開によれば、パラメータ  $t^*$  は  $t^* = 1/2 (ta_{0,j} + tc_{0,j}(k^*))$  に従って選択される。これは A 角度および C 角度における等量の方位変更をもたらす。

30

【 0 1 4 1 】

拡張オイラー角の決定についての上述のアルゴリズムの利点を、図 3 および 4 に示す以下の例により説明する。

【 0 1 4 2 】

Z - Y - X オイラー角の 2 つの三重数がある。

【 0 1 4 3 】

【数 4 0】

$$\begin{aligned} (A_0, B_0, C_0) &= (0, \pi/2-1/2, \pi) \\ (A_1, B_1, C_1) &= (\pi/2, \pi/2-1/2, 0) \end{aligned}$$

40

【 0 1 4 4 】

これらの値が互いに線形に、つまり線形内挿によって誘導されている場合、関連する座標回転について図 3 に示すような構成が存在する。

【 0 1 4 5 】

図 3 は、初めの基本システム I がいかに、各座標軸についての角度の全体的変更の線形内挿によって、目標方位 R へ変換されるかを示す。古典的なオイラー角についての値の範囲の制限の結果、ある状況では、図 3 において座標軸 Z の動きに関して明らかであるよう

50

に、個々の座標軸についてのうねる動きが存在する。図3の下方区域ではその規定範囲の境界が達しており、次により小さい値の範囲へ戻り、それが前記うねりを起こして、図1aに従ったループ形成と同様にロボット用方位制御の不経済な形を表わしており、したがって回避されなければならない。

【0146】

代わりに（初期方位から開始して）適合されたオイラー三重数の決定が起こる場合、以下の式が得られる。

【0147】

【数41】

$$(-\pi/2, \pi/2 + 1/2, \pi) = (A_1 + \pi - 2\pi, \pi - B, C_1 + \pi)$$

【0148】

図4に示すように、関連する回転マトリックスはしたがって直感的に最短の経路を通過して互いへと移り、そのためロボット動作ははるかにより経済的な経路をたどり、それはマニピュレーションプロセスに対する持続時間および空間要件に関して肯定的な影響を及ぼす。図3の場合とは異なり、特徴的なうねりは回避される。

【0149】

この発明に従った拡張オイラー角による動作制御を、表2に、およびフローチャートによる図6に簡略な形で示す。

【0150】

【表2】

表2: 拡張オイラー角を用いたプログラム

作用	拡張オイラー角を決定する				
標準オイラー角を計算する	$(\bar{A}_1, \bar{B}_1, \bar{C}_1)$ $\bar{B}_1 = \pi/2$	$(\bar{A}_2, \bar{B}_2, \bar{C}_2)$	...	$(\bar{A}_{n-1}, \bar{B}_{n-1}, \bar{C}_{n-1})$ $\bar{B}_{n-1} = -\pi/2$	$(\bar{A}_n, \bar{B}_n, \bar{C}_n)$
iStartから拡張オイラー角を決定する	$(A_1, B_1, C_1)$ ←	$(A_2, B_2, C_2)$ = $(A_{iStart}, B_{iStart}, C_{iStart})$	...	$(A_{n-1}, B_{n-1}, C_{n-1})$ →	$(A_n, B_n, C_n)$

作用	拡張オイラー角で方位を表現する				
三次元スラインを計算する	$(A_1, B_1, C_1)$	$(A_2, B_2, C_2)$	...	$(A_{n-1}, B_{n-1}, C_{n-1})$	$(A_n, B_n, C_n)$

【0151】

図7は、ブロック図により、この発明に従った、上述の方法に従ってマニピュレータの動作を制御するのに好適な装置の可能な一展開を示している。マニピュレータは、関連する制御手段2を有する産業用ロボット1の形で示されており、制御手段2は、この発明によれば、特にコンピューティング手段3を有し、それはコンパイラ/インタープリタ4お

10

20

30

40

50

よび内挿ユニット5の形で設定されており、それを介して、動作制御のための前述のアルゴリズムが制御の観点から実行可能である。なぜなら、コンピューティング手段3はロボット1の駆動手段6上の制御手段2内で作動するためである。手動で操作可能な制御ユニット8により、オペレータ7は制御手段2における、特にコンピューティング手段3におけるシーケンスを、たとえばロボット1の方位再設定のその後のプログラミングによって実行できる。

【図面の簡単な説明】

【0152】

【図1】図1 aは先行技術に従った、望ましくないループ形成を有する二次元でのロボット動作の経路曲線を示す図である。図1 bはこの発明に従った、ループ形成のない二次元でのロボット動作の経路曲線を示す図である。

10

【図2】図2 aはオイラー角に関する説明における回転を示す図である。図2 bはオイラー角に関する異なる説明における、図2 aに従った回転を示す図である。

【図3】標準オイラー角を用いた表現における回転動作を示す図である。

【図4】延長または拡張オイラー角を用いた図3の回転を表わす図である。

【図5】四元数アルゴリズムを用いた場合のこの発明に従った方法のフローチャートである。

【図6】オイラー角アルゴリズムを用いた場合のこの発明の方法のフローチャートである。

【図7】この発明に従った装置のブロック図である。

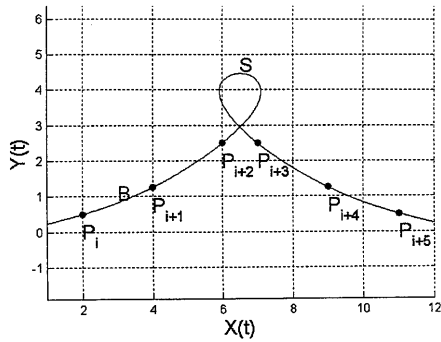
20

【符号の説明】

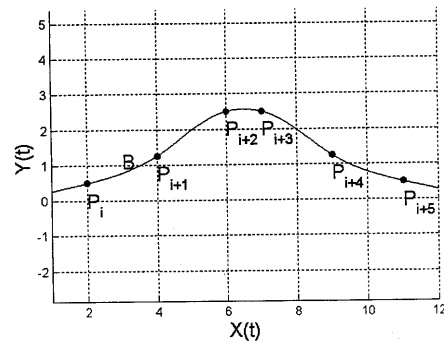
【0153】

1 産業用ロボット、2 制御手段、3 コンピューティング手段、4 コンパイラ/インタープリタ、5 内挿ユニット、6 駆動手段、7 オペレータ、8 制御ユニット

【図1】

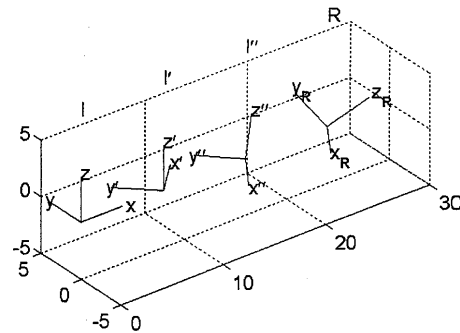


(a)

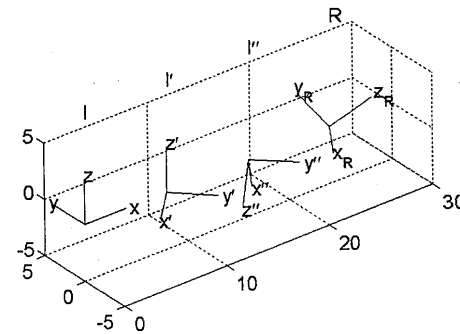


(b)

【図2】

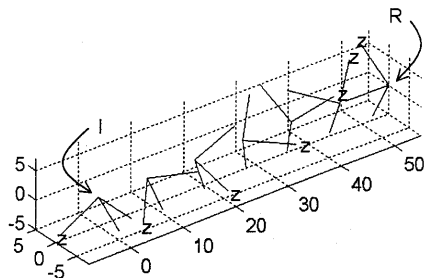


(a)

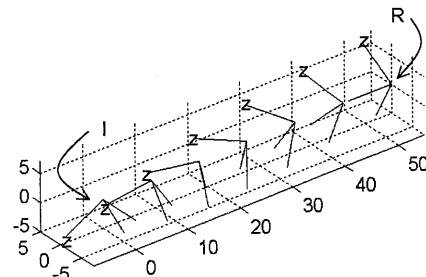


(b)

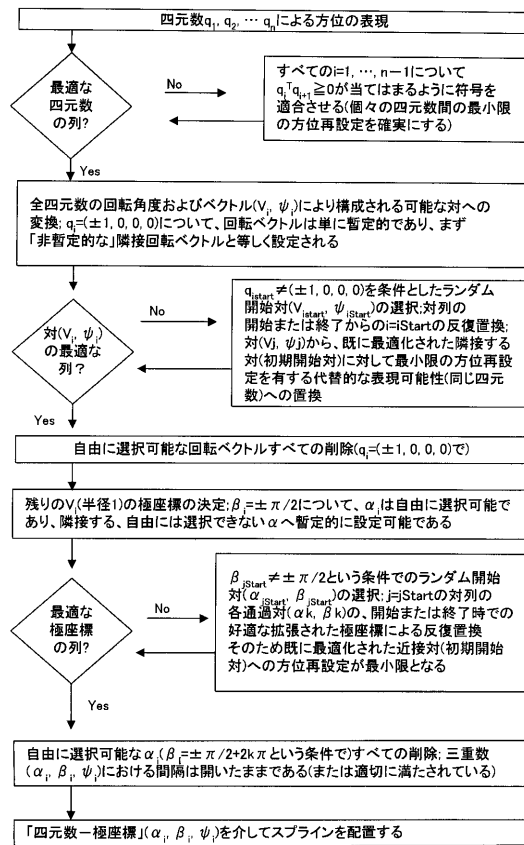
【図3】



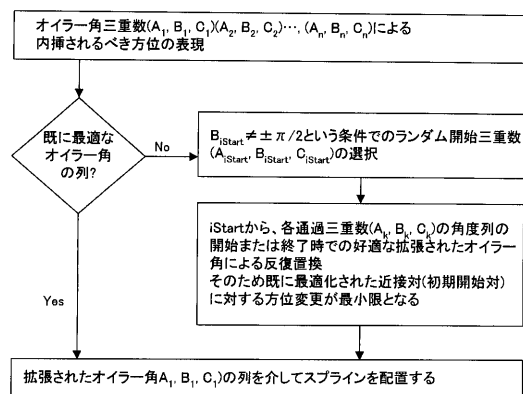
【図4】



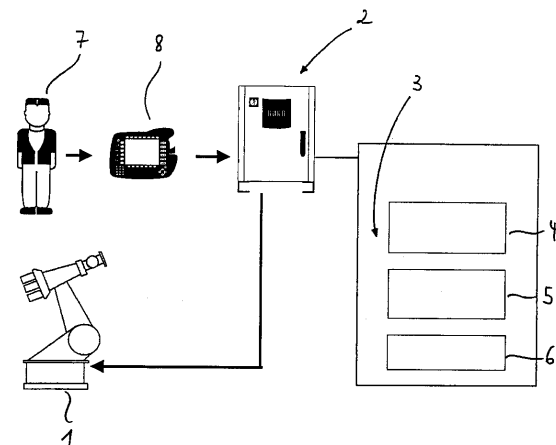
【図5】



【図6】



【図7】



---

フロントページの続き

(74)代理人 100098316

弁理士 野田 久登

(74)代理人 100109162

弁理士 酒井 将行

(72)発明者 マンフレート・ヒュッテンホーファー

ドイツ、デー - 8 6 4 0 5 マイティンゲン、グレーゴル - プロープスト - シュトラーゼ、1 8

(72)発明者 ギュンター・ビーデマン

ドイツ、デー - 8 6 3 6 8 ゲルストホーフェン、ネルケンシュトラーゼ、6

(72)発明者 シュテファン・ブルクハルト

ドイツ、デー - 8 9 4 0 7 ディリンゲン、ビルヘルム - バウアー - シュトラーゼ、1 4

審査官 大山 健

(56)参考文献 特開昭63 - 1 4 1 1 1 0 ( J P , A )

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

B 2 5 J 1 / 0 0 - 2 1 / 0 2