

多関節ロボットの柔軟な突き当てのための 最適速度ベクトル[†]

永田 和之*・小笠原 司**・小 俣 透**

Optimum Velocity Vector of Articulated Robot for Soft Bumping

Kazuyuki NAGATA*, Tsukasa OGASAWARA** and Toru OMATA**

Controlling manipulators during the transition from the free space to the constraint space is important to avoid vibration or crashing of a grasped object in assembly tasks. This paper discusses smoothing the contact of an articulated manipulator with the object in the transition from the free space to the constraint space.

We point out that lateral velocities significantly change the momentum of the manipulator and thus much reduce the contact impact while keeping the pose of the manipulator and the desired velocity in the direction perpendicular to the contact surface.

First, we derive the optimal bumping velocity which minimizes the error between a desired steady state force and an impact force, and apply this method to a 2-link manipulator. Next, the relationship between the optimal bumping velocity and the momentum is considered in terms of energy ellipsoid. Further, we examine the optimal bumping velocity when time delay of contact detection exists. Lastly, simulation results of bumping by the 2-link manipulator are shown.

Key Words: smooth contact, bumping, optimal bumping velocity, energy ellipsoid, 2-link manipulator

1. はじめに

従来のロボットの研究は自由空間での運動が中心であったが、近年ロボットの利用形態が高度化し、バリ

取り作業、組立作業などロボットが外部環境に接触しながら動作することが多くなり、ロボットの接触動作が重要となってきた。接触動作を考えると、まず第1に必要なことは、自由空間から拘束空間へスムーズに移行することである。本論文は、この自由空間から拘束空間への移行問題を中心に扱う。硬い面への突き当てを行う場合、マニピュレータの運動量が急激に変化するため衝撃力が発生する。グラインディング作業では、砥石を突き当てるときの加工面法線方向の衝撃力が加工精度に大きく影響を与えるとともに振動が問題となる。また、組立作業においては、衝撃力は把握状態の変化、接触物体の破損など様々な問題を引き起こす。そのため、突き当て動作では柔らかな接触がのぞまれており、自由空間から拘束空間への移行の制御は大変重要となってきた。

これまでの自由空間から拘束空間への移行問題では Khatib^{1),2)}は多自由度マニピュレータを非干渉化することで1次元モデルに置き換え、接触直後に速度ダンピングをかけることにより衝突エネルギーを吸収し、安定接触を行うことを提案している。また北垣³⁾は1自由度モデルにおける最適接近速度の研究を行い、エンドエフェクタと環境の合成バネ係数、マニピュレータの質量特性、制御パラメータに応じた接触速度の定式化を行った。これらの研究は1自由度モデルを利用しており、多自由度マニピュレータを1自由度モードで動作させて、そのなかでの最適性を求めている。

しかし、マニピュレータはリンク機構なので複雑に干渉しており、マニピュレータの姿勢や突き当て方向の速度が固定されている場合でも、突き当て方向以外に速度を与えることにより運動量の方向、大きさを変えることができる。本論文はこの点に注目し、マニピュレータの突き当て動作を多次元モデルで捉え、突き当て方向以外に速度成分を与えることにより、衝撃力の影響が最小となるように多次元空間における運動量

[†] 第9回ロボット工学会研究会で発表 (1989・6)

* 東北工業技術試験所 仙台市宮城野区苦竹 4-2-1

** 電子技術総合研究所 つくば市梅園 1-1-4

* Government Industrial Research Institute, Tohoku, Sendai

** Electrotechnical Laboratory, Tsukuba

(Received July 20, 1989)

(Revised December 7, 1989)

のひろがりを設定することを考える。衝突直後の制御に関しては、実際のダンピング制御のみを考え、その枠内で衝撃の影響が最小となるようにする。突き当て点の近傍が狭隘な空間である場合は、この方法で指定された方向からのアプローチが不可能となることも考えられるが、最初の突き当ては、比較的広々とした場所で行われるものであり、突き当て方向の選択は自由にできるものとする。

本論文ではまず始めに、ロボットの状態方程式と突き当てのための最適速度ベクトルを導出し、2リンクマニピュレータへの適用例を示す。つぎに、最適突き当て速度と多次元空間における運動量のひろがりの関係についてエネルギー楕円体を用いて考察する。また、接触検出に時間遅れがある場合の最適突き当て速度についても検討する。最後に2リンクマニピュレータについて行った、突き当て動作のシミュレーション結果を報告する。

2. 接触状態での系の状態方程式とその解

マニピュレータがある速度で壁と衝突し、最終的に一定の力 F_d で壁を押す動作を考える。このとき、マニピュレータの運動方程式は

$$M\ddot{x} + f = u$$

$$x = (x_1, \dots, x_6)^T \quad (1)$$

で与えられる。ここで M はマニピュレータ先端における質量マトリクスを表わし、突き当て点近傍では一定マトリクスとみなす。 x はエンドエフェクタの位置と姿勢を表わす一般化座標、 f は環境からうける反力、 u はマニピュレータへの入力ベクトルを表わす。ここで速度フィードバックゲインを K_v 、押し付け力を F_d とし、マニピュレータへの入力ベクトルを

$$u = -K_v \dot{x} + F_d \quad (2)$$

$$K_v = \begin{bmatrix} K_{v1} & 0 \\ 0 & K_{v6} \end{bmatrix} \quad (3)$$

とすると(1)式は

$$M\ddot{x} + f = -K_v \dot{x} + F_d \quad (4)$$

となる。ここで(4)式は

$$\ddot{x} = M^{-1}(-K_v \dot{x} - f + F_d) \quad (5)$$

となる。

6次元空間において、接触面法線方向を x_1 とし、 x_1 方向に接触力 F_d で押し付けるものとする。ただし、ここでは接触面の摩擦は小さいものとして考えないことにする。座標系の原点を x_1 方向は平衡状態の位置に、それ以外の方向は接触点の位置におく。ここでエンドエフェクタと環境の合成バネ係数を k 、平衡状態における x_1 方向の接触面からの変位量を x_d と

し、状態変数を

$$x_s = (x_1 - x_d, \dot{x}_1 - \dot{x}_d, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_6)^T \quad (6)$$

とすると f および F_d はそれぞれ(7)、(8)式のようになる。

$$f = (kx_1, 0, \dots, 0)^T \quad (7)$$

$$F_d = (kx_d, 0, \dots, 0)^T \quad (8)$$

このとき、システムの状態方程式は

$$\dot{x}_s = Ax_s \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ 0 & & & & & \\ \vdots & & & & & \\ -\tilde{m}_1 k & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & -M^{-1}K_v \end{bmatrix} \quad (10)$$

となり、自由系を構成する。ここで

$$M^{-1} = (\tilde{m}_1, \tilde{m}_2, \dots, \tilde{m}_6)$$

$$e_1 = (1, 0, \dots, 0) \quad (11)$$

である。

このとき状態変数の初期値を $x_s(0)$ とすると状態方程式の解は

$$x_s(t) = \exp(At)x_s(0) \quad (12)$$

となる。

3. 衝撃力を緩和する最適突き当て速度ベクトル

3.1 6自由度マニピュレータ

6自由度マニピュレータは、エンドエフェクタに三つの並進速度と三つの回転速度を与えることができる。これら六つの速度成分に関して衝撃力を緩和する最適突き当て速度ベクトルを求める。なお、接触検出に時間遅れがある場合については後ほど検討することにして、ここでは接触検出に時間遅れはないものとする。

発生する力と目標接触力の偏差を y とすると、

$$y = f - F_d \\ = Cx_s \quad (13)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ k & & & & & \\ \vdots & & & & & \\ 0 & & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

となる。評価関数として目標接触力と発生する力の2乗偏差をとり、(15)式で示される評価関数を導入する。なお時間軸の原点はマニピュレータと環境が接触した瞬間とする。

$$I = \int_0^\infty y^T y dt \\ = \int_0^\infty x_s^T C^T C x_s dt \quad (15)$$

(12)式を(15)式へ代入すると評価関数 I は

$$I = x_s^T(0) \int_0^\infty \exp(A^T t) C^T C \exp(At) dt x_s(0) \quad (16)$$

となる。ここで

$$P = \int_0^{\infty} \exp(A^T t) C^T C \exp(A t) dt \quad (17)$$

とおくと評価関数 I は (18) 式のように表わされる。

$$I = \mathbf{x}_s(0)^T P \mathbf{x}_s(0) \quad (18)$$

まず、突き当て方向の速度 v_1 が与えられているときの評価関数 I を最小にする最適つき当て速度 v_i ($i=2 \sim 6$) を求める。ここで、

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{12}^T & P_{22} \end{bmatrix} \quad (19)$$

状態変数の初期値を

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_s(0) &= (-x_d, v_1, v_2, \dots, v_6)^T \\ &= (\mathbf{x}_{s1}^T, \mathbf{x}_{s2}^T)^T \end{aligned} \quad (20)$$

ただし

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{s1} &= (-x_d, v_1)^T \\ \mathbf{x}_{s2} &= (v_2, v_3, v_4, v_5, v_6)^T \end{aligned} \quad (21)$$

とすると、評価関数 I は

$$I = \mathbf{x}_{s1}^T P_{11} \mathbf{x}_{s1} + 2 \mathbf{x}_{s2}^T P_{12} \mathbf{x}_{s1} + \mathbf{x}_{s2}^T P_{22} \mathbf{x}_{s2} \quad (22)$$

となる。

このときつぎの (23) 式が成り立つ。

$$\frac{\partial I}{\partial \mathbf{x}_{s2}} = 0 \quad (23)$$

(22) 式を (23) 式に代入すると

$$2 P_{12}^T \mathbf{x}_{s1} + 2 P_{22} \mathbf{x}_{s2} = 0 \quad (24)$$

これより、求める最適突き当て速度は

$$\mathbf{x}_{s2} = -P_{22}^{-1} P_{12}^T \mathbf{x}_{s1} \quad (25)$$

となる。

なお、接触面法線方向の速度 v_1 が設定されていない場合には、 v_1 の最適速度は

$$\frac{\partial I}{\partial v_1} = 0 \quad (26)$$

へ (25) 式から求めた $v_2 \sim v_6$ を代入することにより求められる。

3.2 2リンクマニピュレータへの適用例

最適突き当て速度の導出を Fig. 1 に示す 2 リンクマニピュレータに適用してみる。

ここで、

θ_i : 関節 i の回転角

m_i : リンク i の質量

I_i : リンク i の質量中心まわりの慣性モーメント

l_i : リンク i の長さ

l_{gi} : 関節 i からリンク i の質量中心までの長さ

である。

いま、突き当て方向を x 軸とし、速度 $\mathbf{v} = (v_x, v_y)^T$ で壁と衝突した後一定の力 $\mathbf{F}_d$ で壁を押し当てる動作を考える。

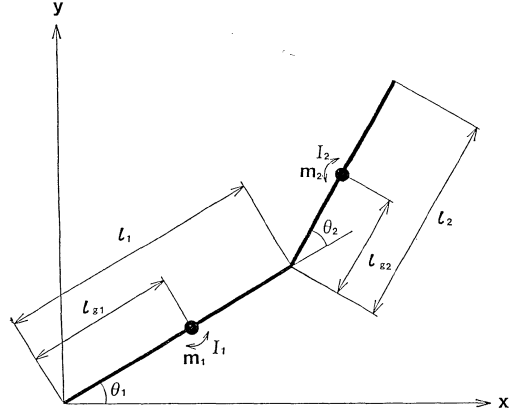


Fig. 1 2-link manipulator

質量マトリクスを

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (27)$$

とすると、 v_y の最適値は (25) 式から

$$\begin{aligned} v_y &= \left(\frac{M_{11}}{M_{12}} \right) \\ &\cdot \left(\frac{(K_{vx} M_{22} + K_{vy} M_{11}) K_{vx} - (M_{11} M_{22} - M_{12}^2) K}{M_{11} (K_{vx} M_{22} + K_{vy} M_{11})} \right. \\ &\quad \left. x_d - v_x \right) \end{aligned} \quad (28)$$

となる。

また、接触面法線方向の速度 v_x が設定されていない場合の v_x の最適値は (26), (28) 式から

$$v_x = \frac{K_{vx} M_{22} + K_{vy} M_{11}}{M_{11} M_{22} - M_{12}^2} x_d \quad (29)$$

となる。

4. マニピュレータの運動量とエネルギー楕円体⁴⁾を用いた衝突メカニズムの定性的考察

マニピュレータの関節角速度を $\dot{\boldsymbol{\theta}} = (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_6)^T$ 、慣性マトリクスを $\mathbf{I}$ (6×6) とするとマニピュレータの運動エネルギーは

$$E = \frac{1}{2} \dot{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{I} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (30)$$

で与えられる。

空間に固定された直交座標系におけるハンド先端の並進速度を $\mathbf{v}$ (3×1)、角速度を $\boldsymbol{\omega}$ (3×1) で表わし、それをまとめて $\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{v}^T, \boldsymbol{\omega}^T)^T$ とおき、 6×6 のヤコビ行列を $\mathbf{J}$ とおくと、関節角と手先速度の関係は

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (31)$$

となるので $|\mathbf{J}| \neq 0$ のとき (30) 式は

$$E = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{J}^{-1T} \mathbf{J} \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}} \quad (32)$$

となる。ここで

$$\mathbf{M} = \mathbf{J}^{-1T} \mathbf{J} \mathbf{J}^{-1} \quad (33)$$

とおくと (32) 式は

$$E = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} \quad (34)$$

となる。 $\mathbf{M}$ はマニピュレータ先端の質量マトリクスである。エネルギー E を一定とおくと (34) 式は 6 次元の楕円体を表わす式となる。この楕円体をエネルギー楕円体という。

ここでエネルギー方程式 (34) を速度で全微分すると

$$dE = (dE/d\dot{\mathbf{x}}) d\dot{\mathbf{x}} \quad (35)$$

となる。ここで $d\dot{\mathbf{x}}$ は楕円体の接線方向を、 $(dE/d\dot{\mathbf{x}})$ は運動量を表わす。エネルギーを一定とすると (35) 式の値は 0 となることから運動量はエネルギー楕円体の法線方向を向く。

したがって、マニピュレータ先端の速度を適当に設定した場合、この速度ベクトルとエネルギー楕円体の交点における法線方向がそのときの運動量の方向となる。

したがって、マニピュレータの姿勢、突き当て方向の速度が固定されている場合でも、横方向の運動成分を付加することにより運動量の方向と大きさを変えることができる。

つぎに、これまで求めてきた目標接触力と発生する力の 2 乗偏差を最小にする最適突き当て速度は、運動量の観点から見るとどういう意味をもつのかを 2 リンクマニピュレータの場合について調べてみる。

いま、質量マトリクスを

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (36)$$

とすると、エネルギー E は

$$E = \frac{1}{2} (M_{11}v_x^2 + 2M_{12}v_xv_y + M_{22}v_y^2) \quad (37)$$

となる。したがって x 方向の運動量を P_x 、 y 方向の運動量を P_y とすると P_x 、 P_y は

$$P_x = M_{11}v_x + M_{12}v_y \quad (38)$$

$$P_y = M_{12}v_x + M_{22}v_y \quad (39)$$

となる。ところで目標接触力と発生する力の 2 乗偏差を最小にする最適突き当て速度を与える (28) 式はつぎのように書き換えられる。

$$M_{11}v_x + M_{12}v_y = C \cdot F_d \quad (40)$$

ここで C は姿勢、速度フィードバックゲイン、バネ係数によって決まる定数を表わしており、左辺は x 方向の運動量を表わしていることから、目標接触力と発

生する力の 2 乗偏差を最小とする最適状態では、 x 方向の運動量と押し付け力は比例関係にあり、北垣らの 1 軸モデルの解析結果と一致する³⁾。

また、接触後平衡状態に達したときの y 方向の接触点からの変位は

$$dy = \frac{M_{22}v_y + M_{12}v_x}{K_{vy}} \quad (41)$$

で与えられる (導出は付録 A 参照)。ここで (41) 式の分子は y 方向の運動量を表わしていることから、平衡状態における y 方向の接触点からの変位もその方向の運動量の大きさに比例する。

これより、速度ダンピングを十分大きくとり、目標接触力を 0 とした場合には、突き当て方向の運動量が 0 となるように速度ベクトルを選べばよい。また、平衡状態で、突き当て方向以外の方向の接触点からの変位量を 0 にするためには、その方向の運動量が 0 となるように速度ベクトルを設定すればよいことがわかる。

5. 接触検出に時間遅れのある場合における最適軌道

通常、マニピュレータが環境と接触した後、その接触が検出され、制御モードを切り換えるまでには時間遅れがある。本章では接触検出に時間遅れがある場合の最適突き当て速度を求める。

自由空間でのマニピュレータの軌道運動は速度サーボによって制御されるものとする。このとき、接触が検出される以前の入力ベクトルは

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_0) \quad (42)$$

となる。ここで $\mathbf{x}_0$ は目標速度ベクトルである。なお、接触検出後の入力ベクトルは (2) 式で表わされる値に切り換えるものとする。

接触が検出されるまでのマニピュレータの運動方程式は (42) 式を (1) 式へ代入して

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{f} = -\mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_0) \quad (43)$$

となる。ここで (43) 式を書き換えると (44) 式のように表わされる。

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} k(x_1 - x_d) + k\dot{x}_d \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_0) \quad (44)$$

ここで状態変数を (6) 式と同様に

$$\dot{\mathbf{x}}_s = (x_1 - x_d, \dot{x}_1 - \dot{x}_d, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_6)^T \quad (45)$$

とし、入力変数を

$$\mathbf{u}_s = (-x_d, v_1, v_2, \dots, v_6)^T \quad (46)$$

接触してからその接触が検出されるまでの時間を T と

すると状態方程式は

$$\dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{A}\mathbf{x}_s + \mathbf{B}\mathbf{u}_s \quad (47)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 0 & \mathbf{e}_1 \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 6 \end{matrix} \quad (48)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 6 \\ 0 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 6 \end{matrix} \quad (49)$$

となる。このとき状態方程式の解を求め、 $t=T$ のときの $\mathbf{x}_s(T)$ を求めると (50) 式のように表わされる。

$$\mathbf{x}_s(T) = \exp(\mathbf{A}T)\mathbf{x}_s(0) + \int_0^T \exp(\mathbf{A}(T-t))\mathbf{B}\mathbf{u}_s dt \quad (50)$$

ところで

$$\mathbf{x}_s(0) = (-x_d, v_1, \dots, v_6)^T \quad (51)$$

なので

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{x}_s(0) \quad (52)$$

となり、(50) 式は

$$\mathbf{x}_s(T) = \{\exp(\mathbf{A}T) + \int_0^T \exp(\mathbf{A}(T-t))\mathbf{B}\mathbf{B}^T \mathbf{x}_s(0) dt\} \mathbf{x}_s(0) \quad (53)$$

となる。ここで

$$\mathbf{Q} = \exp(\mathbf{A}T) + \int_0^T \exp(\mathbf{A}(T-t))\mathbf{B}\mathbf{B}^T \mathbf{x}_s(0) dt \quad (54)$$

とおくと、接触検出時の状態変数は

$$\mathbf{x}_s(T) = \mathbf{Q}\mathbf{x}_s(0) \quad (55)$$

となる。評価関数として接触検出後の目標押し付け力と発生する力の 2 乗偏差をとり、接触検出の遅れが小さいものとして、接触検出時に時間軸の原点をもって

$$\mathbf{x}_s(0)' = \mathbf{x}_s(T) \quad (56)$$

となり、評価関数 I は

$$I = \mathbf{x}_s(0)'^T \mathbf{P} \mathbf{x}_s(0)' = \mathbf{x}_s(0)^T \mathbf{Q}^T \mathbf{P} \mathbf{Q} \mathbf{x}_s(0) \quad (57)$$

となって (18) 式と同じ形となる。ここで (20) 式と同様

$$\mathbf{x}_s(0) = (\mathbf{x}_{s1}^T, \mathbf{x}_{s2}^T)^T \quad (58)$$

ただし

$$\mathbf{x}_{s1} = (-x_d, v_1)^T \quad (59)$$

とし

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{P} \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{11} & \mathbf{Q}_{12} \\ \mathbf{Q}_{12}^T & \mathbf{Q}_{22} \end{bmatrix} \quad (60)$$

とすると、衝撃の影響を最小にする最適突き当て速度は (25) 式と同様に

$$\mathbf{x}_{s2} = -\mathbf{Q}_{22}^{-1} \mathbf{Q}_{12}^T \mathbf{x}_{s1} \quad (61)$$

で与えられる。

6. 2 リンクマニピュレータによる突き当て動作のシミュレーション

いま、リンクパラメータを

$$m_1 = 10.0 \text{ (kg)} \quad m_2 = 8.0 \text{ (kg)}$$

$$I_1 = 0.04167 \text{ (kgm}^2\text{)} \quad I_2 = 0.0267 \text{ (kgm}^2\text{)}$$

$$l_1 = 0.5 \text{ (m)} \quad l_2 = 0.4 \text{ (m)}$$

$$l_{g1} = 0.25 \text{ (m)} \quad l_{g2} = 0.2 \text{ (m)}$$

とし、接触点の位置を $(x, y) = (0.6 \text{ m}, 0.1 \text{ m})$ 、シミュレーションのサンプリングタイムを 0.5 ms として突き当て動作のシミュレーションを行った。このときのマニピュレータの姿勢を Fig. 2 に示す。

制御パラメータおよび (28), (29) 式から求めた最適突き当て速度を Table 1 に、シミュレーション結果を Fig. 3~Fig. 5 に示す。また接触の検出に時間遅れがある場合の制御パラメータおよび最適突き当て速度を Table 2 に、シミュレーション結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。

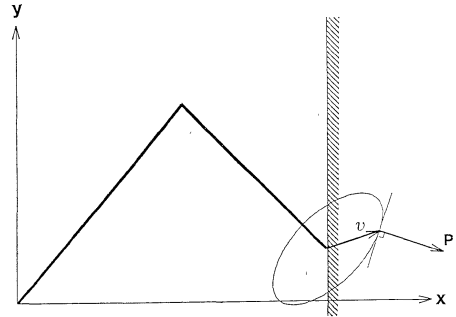


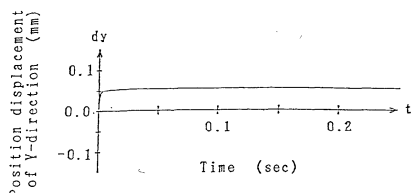
Fig. 2 Contact behavior of a 2-link manipulator

Table 1 Simulation parameters and optimum velocities

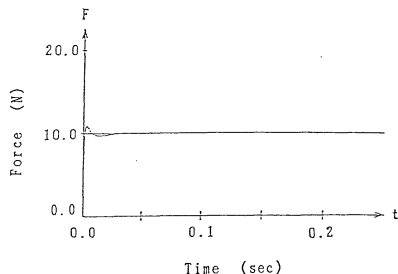
k (N/m)	300,000
F_d (N)	10
K_{vx} (N/m/s)	3,000
K_{vy} (N/m/s)	3,000
v_{xopt} (m/s)	0.055567
v_{yopt} (m/s)	0.063309

Table 2 Simulation parameters and optimum velocities when time delay of contact detection exists

k (N/m)	250,000
F_d (N)	10
T (s)	0.001
K_{vx} (N/m/s)	3,000
K_{vy} (N/m/s)	3,000
v_{xopt} (m/s)	0.026244
v_{yopt} (m/s)	0.030359

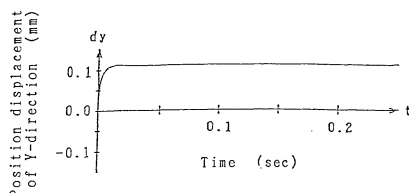


(a) Position response

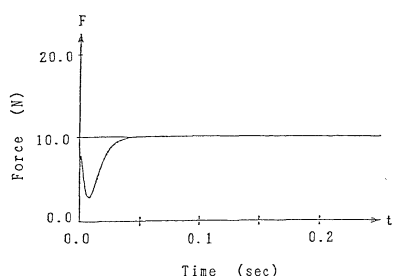


(b) Force response

Fig. 3 Simulation results of bumping by a 2-link manipulator at $v_x=0.055567$ (m/s), $v_y=0.063309$ (m/s)

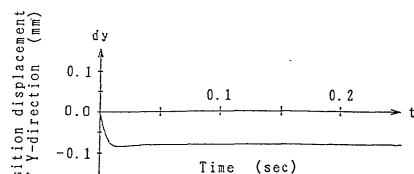


(a) Position response

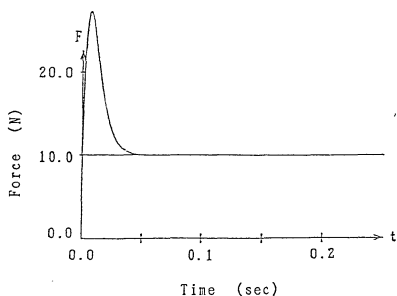


(b) Force response

Fig. 5 Simulation results of bumping by a 2-link manipulator at $v_x=0.055567$ (m/s), $v_y=0.09$ (m/s)



(a) Position response

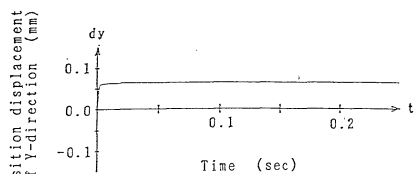


(b) Force response

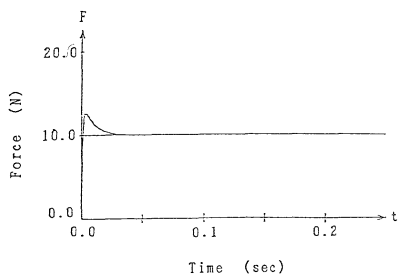
Fig. 4 Simulation results of bumping by a 2-link manipulator at $v_x=0.055567$ (m/s), $v_y=0.0$ (m/s)

Fig. 3~Fig. 5 は突き当て方向の速度を(29)式から求めた最適速度の値に固定したときの応答である。

Fig. 3 は横方向の速度成分を(28)式から求めた最適突き当て速度に、Fig. 4 は横方向の速度成分を 0 にした場合、Fig. 5 は運動量が(40)式で示される値より小さい値、すなわちこの場合では $v_y > v_{yopt}$ とな



(a) Position response



(b) Force response

Fig. 6 Simulation results of bumping by a 2-link manipulator when time delay of contact detection exists and $v_x=0.026244$ (m/s), $v_y=0.030359$ (m/s)

るように横方向の速度を設定した場合の応答である。

これより、横方向の速度を最適に設定することにより接触力のオーバーシュートを小さく抑えるとともに整定時間を早くできることがわかる。

また Fig. 5(b)を見ると、 v_y の値を最適値よりも大きくなるように設定すると、目標値との偏差は大き

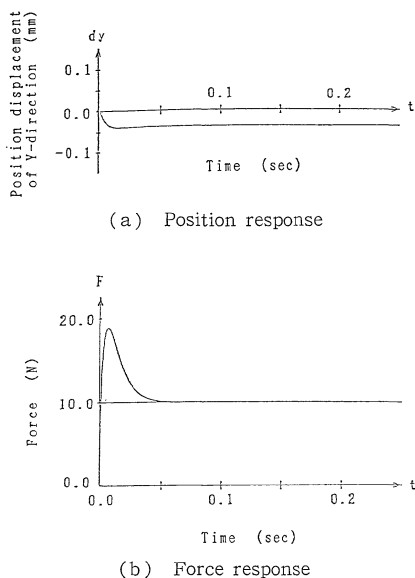


Fig. 7 Simulation results of bumping by a 2-link manipulator when time delay of contact detecting is exist and $v_x=0.026244$ (m/s), $v_y=0.0$ (m/s)

くなるもののオーバーシュートは小さく抑えられていることから、とくに衝撃力の大きさが問題となる場合には接触方向の運動量が最適値よりも若干少なくなるように v_y の値を設定すればよい。

Fig. 6, Fig. 7 は突き当て方向の速度を最適値に固定し、接触の検出に 1ms の時間遅れがある場合の突き当て動作の応答である。Fig. 6 は横方向の速度成分を最適値にした場合、Fig. 7 は横方向に速度成分を与えない場合の応答である。

Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると、接触の検出に時間遅れがある場合でも、横方向の速度を最適に設定することにより、接触力のオーバーシュートを小さく抑えるとともに整定時間を早くすることができる。

6. おわりに

マニピュレータの突き当て動作を多次元モデルで扱い、目標接触力と発生する力の 2 乗偏差を最小にする最適突き当て速度を導出し、これを 2 リンクマニピュレータに適用した。また、マニピュレータのエネルギー方程式から、多自由度ロボットの姿勢や、突き当て方向の速度が固定されている場合でも、横方向に速度成分を付加することで、運動量の方角と大きさを変えられることを示し、2 リンクマニピュレータの場合について最適突き当て速度と運動量の関係を求めた。また接触検出に時間遅れがある場合についても検討し、最

適突き当て速度を導出した。最後に、2 リンクマニピュレータについて突き当て動作のシミュレーションを行い、突き当て方向の速度を一定としたとき、横方向の速度を最適値に設定することで、接触力のオーバーシュートを小さく抑えるとともに整定時間を早くすることができることを示した。本手法はマニピュレータの干渉効果を利用して、突き当て時の衝撃力の緩和を行っているので、突き当て時の慣性マトリクスの非対角要素が大きい場合に特に有効に作用するものと思われる。

本研究は電子技術総合研究所にて行われたものである。本研究をご支援くださった、弓場知能システム部長、熱心な議論と貴重な助言をいただいた高瀬行動知能研究室長ならびに電総研ロボットグループの皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) O. Khatib and J. Burdick: Motion and Force Control of Robot Manipulators, Proc. of IEEE International Conference on Robotic and Automation, 1381/1386 (1986)
- 2) 山田, 藪田: 対象物接触時における位置制御から力制御への切り換え方法に関する考察, 第 27 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 369/370 (1988)
- 3) 北垣, 内山: 外部環境に対するエンドエフェクタの最適接近速度, 第 6 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 467/470 (1988)
- 4) 浅田, 小川: 逆慣性行列を用いたロボットアームの動特性解析とその作業計画ならびにエンドエフェクタ設計への応用, 計測自動制御学会論文集, 23-9, 961/967 (1987)
- 5) 永田, 小笠原, 小俣: ロボットの柔軟な突き当て動作のための最適速度ベクトル, 第 9 回ロボット工学部会研究会資料, 9/17 (1989)

《付 録》

マニピュレータの制御系を

$$M\ddot{x} + f = -K_v\dot{x} + F_d \quad (A.1)$$

とする。 M は質量マトリクス, f は環境からの反力, K_v は速度ダンピングマトリクス, F_d は接触力を表わす。また x は接触点に原点を置くマニピュレータ先端の慣性空間における位置と姿勢を表わす一般化座標を表わす。

ここで x_1 を突き当て方向とし、(A.1) 式をラプラス変換すると (A.2) 式のようになる。

$$s(sI + M^{-1}K_v)x(s) - v = -M^{-1} \begin{bmatrix} k(x_1(s) - x_d/s) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

これより

$$\mathbf{x}(s) = \frac{1}{s} (\mathbf{sI} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_v)^{-1} \cdot \left\{ \mathbf{v} - \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} k(x_1(s) - x_d/s) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{A. 3})$$

ここで

$$\mathbf{C} = (\mathbf{sI} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_v)^{-1} \quad (\text{A. 4})$$

とおくと

$$\begin{aligned} x_1(s) = & \{kx_d(im_{11}c_{11} + \cdots + im_{16}c_{16}) \\ & + (v_1c_{11} + \cdots + v_6c_{16})\} / s(k(im_{11}c_{11} + \cdots \\ & + im_{16}c_{16}) + s) \end{aligned} \quad (\text{A. 5})$$

$$\begin{aligned} x_i(s) = & \{s(v_1c_{i1} + \cdots + v_6c_{i6}) + k(x_d - sx_1(s)) \\ & \cdot (im_{11}c_{11} + \cdots + im_{16}c_{16})\} / s^2 \\ & (i=2 \sim 6) \end{aligned} \quad (\text{A. 6})$$

となる. ここで im_{ij} は行列 $\mathbf{M}^{-1}$ の (i, j) 成分を c_{ij} は行列 $\mathbf{C}$ の (i, j) 成分を表わす. 時間 $t = \infty$ における突き当て方向以外の一般化座標 x_i は最終値の定理より

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s x_i(s) \quad (\text{A. 7})$$

から求められる. $s=0$ のとき

$$\mathbf{C} = \mathbf{K}_v^{-1} \mathbf{M} \quad (\text{A. 8})$$

となることから, (A. 5) ~ (A. 8) 式より平衡状態における i 方向の接触点からの変位は

$$x_i(\infty) = \frac{M_{i1}v_1 + M_{i2}v_2 + \cdots + M_{i6}v_6}{K_{vi}} \quad (\text{A. 9})$$

となる. (A. 9) 式で分子は i ($i=2 \sim 6$) 方向の運動量を, 分母は i 方向の速度フィードバックゲインを表わしている.