2 台の冗長マニピュレータと人間との協調搬送制御* (冗長性を利用した障害物回避の一手法)

浜口 雅史^{*1}, 谷口 隆雄^{*1}

Cooperative Transporting Control for Two Redundant Manipulators and One Human (A Method of Obstacle Avoidance Utilizing Kinematic Redundancy)

Masafumi HAMAGUCHI^{*1} and Takao TANIGUCHI

^{*1} Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University
1060 Nishikawatsu-cho, Matsue-shi, Shimane, 690-8504 Japan

A cooperative transporting control method is proposed for two 7-DOF manipulators and one human in this paper. This control method is based on an impedance control law. An object is transported in any direction according to the force added by the human. The force is measured with a 6-DOF force sensor installed at the wrist of the manipulator. When the manipulators cooperate with the human to transport the object, the manipulators should not only support the human but also avoid some obstacles around them. The manipulators avoid the obstacles by utilizing the kinematic redundancy of the manipulator. The virtual force generated by virtual impedance is used in avoiding action. The virtual impedance is set between the manipulators and the obstacles. The effectiveness of the proposed methods is verified through simulations.

Key Words : Manipulator, Motion Control, Automation, Kinematic Redundancy, Obstacle Avoidance, Human-Robot Interaction, Virtual Impedance

1. 緒 言

これまでは、ロボットの多くが産業用として使用され、人間から隔離された環境下で作業を行ってきた^{(1),(2)}。これからは、家庭などの身近な環境下でロボットが使用されることが期待されており、食事支援ロボット⁽³⁾、手術支援ロボット⁽⁴⁾、介護支援ロボット^{(5),(6)}などの研究がなされている。また、人間とロボットが同一空間内で協調して作業することも考えられている^{(7),(8)}。人間とロボットが協調作業をする際、安全性の観点から、ロボットが人間や障害物に接触しないようにする必要がある。本研究では、人間と冗長マニピュレータとの協調作業を対象とし、マニピュレータの冗長性を利用して障害物を回避させることを考える。このとき、冗長マニピュレータはインピーダンス制御によって制御される。これまでに、冗長マニピュレータのインピーダンス制御に関する研究が多くなされている^{(9)~(11)}。文献(9)では、各関節インピーダンスを調節することによってマニピュレータの姿勢が変えられることを示しており、障害物回避を主目的としてはいない。文献(10)では、力伝達比と可操作度を指標とし、これらの値が大きくなるように冗長自由度を使用しており、障害物回避は考えられていない。文献(11)では、肘関節に仮想外力を加えることによって障害物回避を実現しているが、人間との協調作業を対象としてはいない。ここでは、人間と移動ロボットによる協調搬送⁽¹²⁾ではなく、人とマニピュレータの協調搬送を対象とする。すなわち、マニピュレータは固定されており、人とマニピュレータが協調して物体を搬送するが、その搬送距離はマニピュレータの可動範囲内とする。また、大型の重量物でも搬送可能なように、2 台の冗長マニピュレータを用いることを考える。2 台のマニピュレータを用いた研究では、マニピュレータ同士による協調作業を対象としたもの^{(13)~(16)}や、人間とマニピュレータとの協調作業を対象としたもの^{(17),(18)}がある。文献(17)では、障害

* 原稿受付 2013 年 4 月 25 日

^{*1} 正員, 島根大学大学院 総合理工学研究科 (〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060)
E-mail: hamaguchi@ecs.shimane-u.ac.jp

物回避を考慮しておらず、文献(18)は冗長マニピュレータの冗長性を用いて障害物を回避するものではない。

冗長マニピュレータを駆使して人間の思い通りに協調して作業ができれば、マニピュレータは人間をサポートするばかりでなく、周囲に障害物が存在してもこれを回避しながら作業をすることができる。そして、このような冗長マニピュレータを備えたヒューマノイド・ロボットが将来、人間の身近な存在になったときには、日常生活などの様々な環境に柔軟に対応しながら人間とともに作業することができる。また、人間とロボットが意思疎通を図る手段として音声認識による方法が考えられるが、声の個人差や認識精度などの課題がある。そこで、互いの力のやりとりによって意思疎通を図ることができれば、万人が容易に使用できるロボットになる。

本研究では、まず人間と2台の7自由度マニピュレータとで共に一つの搬送物を把持し、人間の思い通りに協調搬送作業するための制御方法を提案する。人間が搬送物を通してマニピュレータに与える力やモーメントをリストセンサにより検出し、これに基づいて人間に追従するようにマニピュレータを動作させることで、人間の思い通りの搬送を可能にする。本手法では、力制御ベースのインピーダンス制御則⁽¹⁹⁾を用いる。

つぎに、マニピュレータの冗長性を利用し、協調搬送時に障害物回避を行う方法を提案する。具体的には、障害物とマニピュレータ間に仮想インピーダンスを設定し、マニピュレータが障害物に接近した際に発生する仮想外力によって関節の速度ベクトルを決定し、障害物回避を行う。提案手法の有効性はシミュレーションにより検証される。

Fig. 1 Cooperative Transporting System

Fig. 2 Coordinate system

Fig. 3 Joint of 7-DOF manipulator

2. 協調搬送の制御方法

人間と2台の7自由度マニピュレータが一つの搬送物を把持し、人間の思い通りに協調搬送作業するための制御方法について述べる。

2・1 協調搬送システム

図1に人間の両手および2台の7自由度マニピュレータにより搬送物を把持している様子を示す。マニピュレータは三菱重工製可搬式汎用知能アーム PA-10 を2台使用することを想定している。各マニピュレータの手首に

は 6 軸リストセンサを備えている。使用する座標系を図 2 に示す。 Σ の左肩付添字 A, B, L, R, O はそれぞれ、マニピュレータ A, B の手先、人間の左右の手先、搬送物の重心を表す。また、基準座標系 ${}^0\Sigma$ は、マニピュレータ A のベース座標系と一致している。7 自由度マニピュレータの各関節の可動方向ならびに名称を図 3 に示す。

本研究では、搬送物として平板を考えており、その寸法は、長さ l_x 、幅 l_y 、厚さ l_z であり、質量は m である。なお、搬送物の形状と質量ならびに把持位置が既知であれば、本提案手法を適用することができる。

2・2 制御方法

マニピュレータの制御方法として、力制御ベースのインピーダンス制御則⁽¹⁹⁾を用いる。そして、人間から搬送物を介してマニピュレータの手先に与えられる力に応じて手先の目標値を決める。これにより、マニピュレータは人間と協調して搬送作業を行うことができる。

以下では、主にマニピュレータ A について述べるが、マニピュレータ B についても同様に考える。マニピュレータの手先の望ましいインピーダンスは

$$\mathbf{M}_e \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{B}_e (\dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_d) + \mathbf{K}_e (\mathbf{r} - \mathbf{r}_d) = \mathbf{F}_{ext} \quad (1)$$

と表される。ここで

$$\mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_O & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_O \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_p & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_\alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_p & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_\alpha \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \boldsymbol{\alpha} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_{ext} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

であり、 $\mathbf{M}_e, \mathbf{B}_e, \mathbf{K}_e$ は、それぞれ手先の希望慣性行列、希望粘性行列、希望剛性行列である。 $\mathbf{p}$ は ${}^0\Sigma$ におけるマニピュレータ手先の位置ベクトル、 $\boldsymbol{\alpha}$ は X_0, Y_0, Z_0 軸回りの回転角からなるマニピュレータ手先の姿勢ベクトルである。 $\mathbf{F}_{ext}$ は ${}^0\Sigma$ におけるマニピュレータ手先に加わる力 $\mathbf{f}$ およびモーメント $\mathbf{n}$ からなる外力である。なお、添字 d は目標値を表す。式(1)の右边を

$$\mathbf{F}_{ext} = \mathbf{M}_e \ddot{\mathbf{r}}_d \quad (3)$$

とおき、左辺へ移項すると次式が得られる。

$$\mathbf{M}_e (\ddot{\mathbf{r}} - \ddot{\mathbf{r}}_d) + \mathbf{B}_e (\dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_d) + \mathbf{K}_e (\mathbf{r} - \mathbf{r}_d) = \mathbf{0} \quad (4)$$

一方、マニピュレータの運動方程式は次式で与えられる。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} + \mathbf{g} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_{ext} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{M}, \mathbf{h}, \mathbf{g}$ は、それぞれ慣性行列、コリオリ力・遠心力による項、重力項である。 $\mathbf{q}$ は関節角度ベクトル、 $\boldsymbol{\tau}$ は関節への入力トルク、 $\mathbf{J}$ はヤコビ行列である。式(4)を実現するための入力トルクは

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \left[\left\{ \mathbf{J} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}^T \right\}^{-1} \left\{ \ddot{\mathbf{r}}_d + \mathbf{M}_e^{-1} (-\mathbf{B}_e (\dot{\mathbf{r}} - \dot{\mathbf{r}}_d) - \mathbf{K}_e (\mathbf{r} - \mathbf{r}_d)) - \ddot{\mathbf{q}} \right\} \right] - \mathbf{J}^T \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{h} + \mathbf{g} \quad (6)$$

となる。

つぎに、式(4)の $\mathbf{M}_e, \mathbf{B}_e, \mathbf{K}_e$ の決定方法について述べる。 $\mathbf{M}_e$ は実際の搬送物の情報から以下のように与える。

$$\mathbf{M}_O = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_O = {}^0\mathbf{R}_A \begin{bmatrix} I_{xx} + m\ell_y^2 & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} + m\ell_x^2 & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} + m(\ell_x^2 + \ell_y^2) \end{bmatrix} ({}^0\mathbf{R}_A)^T \quad (7)$$

$$I_{xx} = \frac{m}{12} (\ell_y^2 + \ell_z^2), \quad I_{yy} = \frac{m}{12} (\ell_x^2 + \ell_z^2), \quad I_{zz} = \frac{m}{12} (\ell_x^2 + \ell_y^2) \quad (8)$$

ここで、 ${}^0\mathbf{R}_A$ は手先座標系 ${}^4\Sigma$ から基準座標系 ${}^0\Sigma$ への回転行列である。 $\mathbf{M}_e$ は設計者により、任意に値を与えることができるが、実際の搬送物に近い慣性の方が作業者にとって違和感が少ないと考え、上記の値とした。

$\mathbf{B}_e, \mathbf{K}_e$ は、式(4)中の $\mathbf{r} - \mathbf{r}_d$ が速やかに $\mathbf{0}$ に収束する様に与える。式(4)の位置成分について考える。

$$\mathbf{M}_O \Delta \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{B}_p \Delta \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_p \Delta \mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (9)$$

ただし, $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p} - \mathbf{p}_d$ である. 上式において, 両辺の左側から $\mathbf{M}_O$ の逆行列を掛けると次式となる.

$$\Delta \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{M}_O^{-1} \mathbf{B}_p \Delta \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{M}_O^{-1} \mathbf{K}_p \Delta \mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (10)$$

上式は 2 次遅れ系であるので,

$$\mathbf{M}_O^{-1} \mathbf{B}_p = \text{diag}(2\zeta_c \omega_c, 2\zeta_c \omega_c, 2\zeta_c \omega_c), \quad \mathbf{M}_O^{-1} \mathbf{K}_p = \text{diag}(\omega_c^2, \omega_c^2, \omega_c^2), \quad \zeta_c > 0, \quad \omega_c > 0 \quad (11)$$

とおくことにより, 式(10)の $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{0}$, すなわち $\mathbf{p} = \mathbf{p}_d$ とすることができる. なお, $\mathbf{B}_\alpha, \mathbf{K}_\alpha$ も同様にして与える.

つぎに, 目標値 $\ddot{\mathbf{r}}_d$ を $\mathbf{F}_{ext}$ より求める方法について説明する. 座標系 ${}^L\Sigma$ において人間の左手が搬送物に加える力 ${}^L\mathbf{f}_L$ とモーメント ${}^L\mathbf{n}_L$, ならびに座標系 ${}^R\Sigma$ において右手が搬送物に加える力 ${}^R\mathbf{f}_R$ とモーメント ${}^R\mathbf{n}_R$ を

$${}^L\mathbf{f}_L = \begin{bmatrix} {}^L f_{xL} \\ {}^L f_{yL} \\ {}^L f_{zL} \end{bmatrix}, \quad {}^L\mathbf{n}_L = \begin{bmatrix} {}^L n_{xL} \\ {}^L n_{yL} \\ {}^L n_{zL} \end{bmatrix}, \quad {}^R\mathbf{f}_R = \begin{bmatrix} {}^R f_{xR} \\ {}^R f_{yR} \\ {}^R f_{zR} \end{bmatrix}, \quad {}^R\mathbf{n}_R = \begin{bmatrix} {}^R n_{xR} \\ {}^R n_{yR} \\ {}^R n_{zR} \end{bmatrix} \quad (12)$$

とする. なお, 座標系を左肩の添字は, そのベクトルが基づく座標系を表すが, 基準座標系 ${}^0\Sigma$ の場合は, 左肩の添字 0 を省略する. このとき, マニピュレータ A の手先が受ける力 ${}^A\mathbf{f}_A$ とモーメント ${}^A\mathbf{n}_A$, ならびにマニピュレータ B の手先が受ける力 ${}^B\mathbf{f}_B$ とモーメント ${}^B\mathbf{n}_B$ は

$${}^A\mathbf{f}_A = \begin{bmatrix} {}^A f_{xA} \\ {}^A f_{yA} \\ {}^A f_{zA} \end{bmatrix} = {}^A\mathbf{R}_L {}^L\mathbf{f}_L + \begin{bmatrix} -\frac{{}^L n_{yL}}{\ell_x} + \frac{{}^R n_{xR}}{\ell_y} - \frac{{}^R n_{yR}}{\ell_x} \\ -\frac{{}^L n_{zL}}{\ell_x} - \frac{{}^R n_{zR}}{\ell_x} \\ \frac{{}^R n_{zR}}{\ell_y} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^A\mathbf{n}_A = \begin{bmatrix} {}^A n_{xA} \\ {}^A n_{yA} \\ {}^A n_{zA} \end{bmatrix} = {}^A\mathbf{p}_{OL} \times ({}^A\mathbf{R}_L {}^L\mathbf{f}_L) + {}^A\mathbf{p}_{OR} \times ({}^A\mathbf{R}_R {}^R\mathbf{f}_R) + {}^A\mathbf{R}_L {}^L\mathbf{n}_L + {}^A\mathbf{R}_R {}^R\mathbf{n}_R \quad (14)$$

$${}^B\mathbf{f}_B = \begin{bmatrix} {}^B f_{xB} \\ {}^B f_{yB} \\ {}^B f_{zB} \end{bmatrix} = {}^B\mathbf{R}_R {}^R\mathbf{f}_R + \begin{bmatrix} -\frac{{}^L n_{xL}}{\ell_y} - \frac{{}^L n_{yL}}{\ell_x} - \frac{{}^R n_{yR}}{\ell_x} \\ -\frac{{}^L n_{zL}}{\ell_x} - \frac{{}^R n_{zR}}{\ell_x} \\ -\frac{{}^L n_{zL}}{\ell_y} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^B\mathbf{n}_B = \begin{bmatrix} {}^B n_{xB} \\ {}^B n_{yB} \\ {}^B n_{zB} \end{bmatrix} = {}^B\mathbf{p}_{OL} \times ({}^B\mathbf{R}_L {}^L\mathbf{f}_L) + {}^B\mathbf{p}_{OR} \times ({}^B\mathbf{R}_R {}^R\mathbf{f}_R) + {}^B\mathbf{R}_L {}^L\mathbf{n}_L + {}^B\mathbf{R}_R {}^R\mathbf{n}_R \quad (16)$$

となる. ここで, ${}^A\mathbf{R}_L$ は座標系 ${}^L\Sigma$ から座標系 ${}^A\Sigma$ への回転行列, ${}^A\mathbf{R}_R$ は ${}^R\Sigma$ から ${}^A\Sigma$ への回転行列, ${}^B\mathbf{R}_R$ は ${}^R\Sigma$ から ${}^B\Sigma$ への回転行列, ${}^B\mathbf{R}_L$ は ${}^L\Sigma$ から ${}^B\Sigma$ への回転行列, ${}^A\mathbf{p}_{OL}$ は ${}^A\Sigma$ における ${}^L\Sigma$ の原点 O_L の位置ベクトル, ${}^A\mathbf{p}_{OR}$ は ${}^A\Sigma$ における ${}^R\Sigma$ の原点 O_R の位置ベクトル, ${}^B\mathbf{p}_{OL}$ は ${}^B\Sigma$ における O_L の位置ベクトル, ${}^B\mathbf{p}_{OR}$ は ${}^B\Sigma$ における O_R の位置ベクトルである. なお, 以下で考える作業では, 人間の力指令は ${}^L\mathbf{f}_L = {}^R\mathbf{f}_R$ および ${}^L\mathbf{n}_L = {}^R\mathbf{n}_R$ とする.

搬送物を X_O 軸 (Y_O 軸) 方向へ並進搬送する場合には, 人間は X_L, X_R 軸 (Y_L, Y_R 軸) 方向へ力を加える. このとき, マニピュレータの手先にはそれぞれ同様の方向に力が加わる. そこで, 手先に加わる力に基づいて, これと同じ方向の加速度を手先に発生させれば並進搬送を行うことができる. そこで, $\ddot{\mathbf{p}}_d$ を次式より求める.

$$\ddot{\mathbf{p}}_d = \mathbf{M}_O^{-1} {}^0\mathbf{R}_A {}^A\mathbf{R}_L \begin{bmatrix} {}^L f_{xA} & {}^L f_{yA} & 0 \end{bmatrix}^T = \mathbf{M}_O^{-1} {}^0\mathbf{R}_A \begin{bmatrix} 0 & {}^A f_{yA} & {}^A f_{zA} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

搬送物を Z_O 軸方向へ並進搬送する場合には, 人間は Z_L, Z_R 軸方向へ力を加える. このとき, マニピュレータの手先には, 距離 l_x に応じたモーメント ${}^A n_{yA}$ が加わる. したがって, $\ddot{\mathbf{p}}_d$ を次式より求める.

$$\ddot{\mathbf{p}}_d = \mathbf{M}_O^{-1} {}^0\mathbf{R}_A \begin{bmatrix} {}^A n_{yA}/l_x & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (18)$$

なお, 搬送物を並進搬送する際は, 搬送物に初期姿勢を保持させるため, $\ddot{\boldsymbol{\alpha}}_d = \mathbf{0}$ とする.

Y_O 軸回りに搬送物の姿勢を変える場合には, 人間は Y_L, Y_R 軸回りにモーメントを加える. このとき, 距離 l_x に応じた力がマニピュレータの手先に加わる. そこで, この力に応じて手先位置を変えながら, その力に等価な Y_A 軸回りのモーメント $-{}^A f_{xA} l_x$ により手先姿勢を変えるような目標値を求める. すなわち,

$$\ddot{\mathbf{p}}_d = \mathbf{M}_O^{-1} {}^0\mathbf{R}_A \begin{bmatrix} -{}^L n_{yL}/l_x & 0 & 0 \end{bmatrix}^T = \mathbf{M}_O^{-1} {}^0\mathbf{R}_A \begin{bmatrix} {}^A f_{xA} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

$$\ddot{\boldsymbol{\alpha}}_d = \mathbf{I}_O^{-1} {}^0\mathbf{R}_A \begin{bmatrix} 0 & -{}^A f_{xA} l_x & 0 \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

とする. 式(17)~(19)をまとめて次式が得られる.

$$\ddot{\mathbf{p}}_d = \mathbf{M}_O^{-1} {}^0\mathbf{R}_A \begin{bmatrix} {}^A f_{xA} + {}^A n_{yA}/l_x & {}^A f_{yA} & {}^A f_{zA} \end{bmatrix}^T, \quad \ddot{\boldsymbol{\alpha}}_d = \mathbf{I}_O^{-1} {}^0\mathbf{R}_A \begin{bmatrix} 0 & -{}^A f_{xA} l_x & 0 \end{bmatrix}^T \quad (21)$$

以上より, マニピュレータの手先に人間から加えられる外力 $\mathbf{F}_{ext}$ に応じた手先の目標値 $\ddot{\mathbf{r}}_d$ を与え, 人間の力指令に応じてマニピュレータを動作させることができる. なお, $\dot{\mathbf{r}}_d, \mathbf{r}_d$ は, $\ddot{\mathbf{r}}_d$ を数値積分して算出される.

Table 1 Values of link parameters

l_b [m]	0.315	m_1 [kg]	9.78	k_1 [m]	0.147
l_s [m]	0.450	m_2 [kg]	8.41	k_2 [m]	0.063
l_e [m]	0.500	m_3 [kg]	3.51	k_3 [m]	0.089
l_w [m]	0.080	m_4 [kg]	4.31	k_4 [m]	0.046
l_h [m]	0.121	m_5 [kg]	3.45	k_5 [m]	0.165
		m_6 [kg]	1.46	k_6 [m]	0.030
		m_7 [kg]	0.24	k_7 [m]	0.085
		m_8 [kg]	0.98	k_8 [m]	0.051

Table 2 Values of moment of inertia

Link	I_x [kgm ²]	I_y [kgm ²]	I_z [kgm ²]
1	0.1528	0.1322	0.0646
2	0.0900	0.0266	0.0794
3	0.0462	0.0337	0.0183
4	0.0307	0.0081	0.0272
5	0.0392	0.0375	0.0081
6	0.0039	0.0008	0.0039
7	0.0001	0.0001	0.0002
8	0.0011	0.0013	0.0008

Fig. 4 Link parameters of 7-DOF manipulator

2・3 シミュレーションモデル

マニピュレータのシミュレーションモデルを構築した。図4にマニピュレータのリンクパラメータを、表1にリンクパラメータ値を、表2にリンクの慣性モーメント値を示す。これらの値は、PA-10を実測して算出した。1台のマニピュレータについて、初期姿勢 $q(0) = [0^\circ, 30^\circ, 0^\circ, 60^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^\top$ とし、手先に適当な軌道を与えてマニピュレータを動作させた。そのときの手先位置の変化を図5, 6に示す。図中の細線はシミュレーション結果を、太線は実験結果を表すが、両者は良好に一致している。この結果は一例であるが、他の条件においても、両者は良好に一致していた。よって、このモデルを用いて協調搬送シミュレーションを行う。

Fig. 5 Verification of simulation model (1)

Fig. 6 Verification of simulation model (2)

2・4 シミュレーション結果

提案した制御方法の有効性を確認するためにシミュレーションを行った。ただし、 $l_x = l_y = 0.80[\text{m}]$, $l_z = 0.02[\text{m}]$, $m = 2.0[\text{kg}]$ とし、式(11)の $\zeta_c = 1.0$, $\omega_c = 30.0[\text{rad/s}]$ とした。初期姿勢は図1の通りとし、2台のマニピュレータとも $q(0) = [0^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 0^\circ]^\top$ である。この初期姿勢において、座標系 ${}^0\Sigma$ と ${}^1\Sigma$ の各軸方向は一致している。

まず、 X_0 軸方向への並進搬送作業をシミュレーションした。人間が与える力を図7に示す。ただし、搬送物の自重補償分の力は人間およびマニピュレータの各手先から常に自重の1/4ずつ与えられているものとし、図7には力の変化分のみを示す（以下同様）。なお、搬送物の自重すべてをマニピュレータに負わせることも可能であるが、ここでは、人間も搬送物の重さを感じることができるようにした。このときのマニピュレータの手先位置の X_0 軸方向の時間変化を、その目標値とともに図8に示す。二つの曲線が重なっていることから、手先が目標値に追従しながら移動していることが分かる。また、図9に最終時刻における搬送物とマニピュレータの状態を示す。図1と比較することにより、 X_0 軸方向への並進搬送が行われたことが分かる。

つぎに、 Z_0 軸方向への並進搬送作業をシミュレーションした。人間が与える力を図10に示す。 Z_0 軸方向のマニピュレータの手先位置の時間変化を、その目標値とともに図11に示す。同図より、手先位置が目標値に追従しながら移動していることが分かる。図12に最終時刻における搬送物とマニピュレータの状態を示す。図1と比較することにより、 Z_0 軸方向への並進搬送が行われたことが分かる。

最後に、 Y_0 軸回りに搬送物の姿勢を変える作業をシミュレーションした。人間が与えるモーメントを図13に示す。 Y_0 軸回りの搬送物の姿勢変化の様子を、その目標値とともに図14に示す。姿勢が目標値に追従していることが分かる。図15に最終時刻における搬送物とマニピュレータの状態を示す。図1と比較することにより、搬送物の姿勢が変化し、それに伴いマニピュレータの手先位置も変化していることを確認することができる。

Fig. 7 Human force command in X_0 direction

Fig. 8 Position of end-effector in X_0 direction

Fig. 9 Scene in simulation at 5.0s of Fig. 8

Fig. 10 Human force command in Z_0 direction Fig. 11 Position of end-effector in Z_0 direction

Fig. 12 Scene in simulation at 5.0s of Fig. 11

Fig. 13 Human moment command around Y_0 axis Fig. 14 Orientation of object around Y_0 axis

Fig. 15 Scene in simulation at 5.0s of Fig. 14

3. 障害物の回避方法

図 16 に示すように、マニピュレータ上方に静止した板状の障害物が存在している場合を考える。このとき、搬送物の搬送方向（例えば、 X_0 軸の負方向）によっては、マニピュレータの第 4 関節（肘）が障害物に衝突する。本研究では、障害物にマニピュレータの肘が接近した際に、搬送物の搬送作業を妨げずに障害物との衝突を回避する方法を提案する。すなわち、7 自由度マニピュレータの冗長性を利用し、マニピュレータの手先位置・姿勢ならびに手先のインピーダンスを変えずにマニピュレータの肘の位置を変化させて障害物を回避させる。

Fig. 16 Layout of obstacle

Fig. 17 Arm movement with τ_j

3・1 冗長性の利用法

冗長性を利用して関節への入力トルクを算出する方法について述べる。関節への入力トルク τ を

$$\tau = \tau_e + \tau_j \quad (22)$$

とする。ただし、

$$\tau_j = M_j (\ddot{q}_d - \ddot{q}) + B_j (\dot{q}_d - \dot{q}) + K_j (q_d - q) \quad (23)$$

である。ここで、 τ_e は第 2 章で示した協調搬送のためのトルク入力、 τ_j は手先の運動に関与せず、手先のインピーダンスを変えずに関節を動かすためのトルク入力である。行列 M_j, B_j, K_j は次式で与えられる⁹⁾。

$$M_j = \Gamma M_j^* \Gamma^T, \quad B_j = \Gamma B_j^* \Gamma^T, \quad K_j = \Gamma K_j^* \Gamma^T \quad (24)$$

ここで、関節の希望慣性行列を M_j^* 、希望粘性行列を B_j^* 、希望剛性行列を K_j^* とし、行列 Γ を次式で与える。

$$\Gamma = I - \left(\bar{J} (W^{-1} \bar{J})^+ W^{-1} \right)^T, \quad \bar{J} = M^{-1} J^T (J M^{-1} J^T)^{-1} \quad (25)$$

ここで、 I は単位行列、 W は正定で対角な重み行列であり、 $(\cdot)^+$ は一般化逆行列を表す。文献(9)では、関節の目標値 q_d を一定値で与えていたが、本研究では障害物を回避するように q_d を与える。

関節の目標値 q_d の算出方法について説明する。図 17 に示すように、現在の時刻 t における関節角度 $q(t)$ から $\Delta q(t)$ だけ動かした角度を、時刻 t での目標値 $q_d(t)$ とする。すなわち、

$$q_d(t) = q(t) + \Delta q(t) \quad (26)$$

である。 Δq は逆運動学計算により算出される。冗長マニピュレータの逆運動学問題の一般解は

$$\dot{q} = J^+ \dot{r} + P^\perp \dot{\psi} \quad (27)$$

と表される。ここで、 $P^\perp$ は J に関する手先のデカルト座標系へのヌル射影オペレータ、 $\dot{\psi}$ は冗長自由度を利用して任意に設定できる関節変数の速度ベクトルである。上式において $\dot{r} = \mathbf{0}$ としたときの $\dot{q}$ を数値積分したものを Δq とする。 $\dot{q}_d, \ddot{q}_d$ は、 q_d を数値微分することにより算出される。

3・2 $\dot{\psi}$ の要素の選択

冗長性を利用する場合に、式(27)の $\dot{\psi}$ をどのように与えるかが問題となる。ここでは、肘の動きに最も影響を与える $\dot{\psi}$ の要素を1つだけ選択し、その要素のみに値を与え、その他の要素はすべて0とすることにより、問題を簡素化する。7自由度マニピュレータでは、

$$\dot{\psi} = [\dot{\psi}_1 \ \dot{\psi}_2 \ \dot{\psi}_3 \ \dot{\psi}_4 \ \dot{\psi}_5 \ \dot{\psi}_6 \ \dot{\psi}_7]^T \quad (28)$$

となる。人間の力指令の無い状態で、 $\dot{\psi}$ の1要素のみを2.0s間一定値 $180/\pi[\text{deg/s}]$ としたときの肘位置の変化をシミュレーションにより調べた。このときの初期姿勢は図1の通りである。また、 M_j^*, B_j^*, K_j^*, W は、いずれも同一要素からなる対角行列とし、対角要素はそれぞれ $1.0[\text{kg}]$, $20.0[\text{Ns/m}]$, $100.0[\text{N/m}]$, 1.0 とした。なお、逆運動学計算のアルゴリズムは文献(20)のものをを用いた。肘の高さ(Z_0 軸に関する位置)に関するシミュレーション結果を図18に示す。なお、 $\dot{\psi}_2, \dot{\psi}_4, \dot{\psi}_6$ については高さが変化しなかったため割愛してある。同図より、 $\dot{\psi}_3$ に値を与えたときに最も肘の高さが変化していることが分かる。よって、 $\dot{\psi}_3$ 要素を選択することにする。

3・3 障害物の回避方法

障害物を回避するために、障害物との距離に応じて $\dot{\psi}_3$ を与える方法について説明する。文献(21)を参考にし、障害物とマニピュレータ間に仮想インピーダンスを設定する(図19参照)。肘にはこれを覆う仮想的な球(半径： R_4)を考える。この球が障害物に接近したときに発生する Z_0 軸方向の仮想外力 f_{oz} を次式で与える。

$$f_{oz} = \begin{cases} K \left(\frac{1}{d_z - L_{\min}} - \frac{1}{L_{\max} - L_{\min}} \right) \frac{z_s - z_o}{d_z} + D \left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{d_z - L_{\min}} \right) (\dot{z}_s - \dot{z}_o) & : L_{\min} < d_z \leq L_{\max} \\ 0 & : d_z > L_{\max} \end{cases} \quad (29)$$

ここで、

$$z_s = z_4 + R_4, \quad d_z = |z_o - z_s| \quad (30)$$

であり、 z_4 はマニピュレータの第4関節(肘)の Z_0 軸方向の位置(高さ)、 z_s は仮想球上の頂点高さ、 z_o は障害物の高さ、 d_z は仮想球と障害物間の距離である。 $K, D, L_{\max}, L_{\min}$ は設計パラメータであり、 K はばね定数、 D は減衰係数、 $L_{\max}$ はばねの最大長さ(自然長)、 $L_{\min}$ はばねの最小長さを表す。なお、ここでは静止障害物を対象としているため、 $\dot{z}_o = 0$ となる。 f_{oz} の発生範囲は $L_{\max}$ により規定することができる。そして、この f_{oz} を用いて $\dot{\psi}_3$ を次式で与える。

$$\dot{\psi}_3 = K_{\text{sgn}} f_{oz} \quad (31)$$

ここで、係数 K_{sgn} は肘を動かす向きを規定し、+1または-1の値である。障害物への接近度に応じて $\dot{\psi}_3$ に値を与えることにより、マニピュレータと障害物との衝突を回避させることができる。

Fig. 18 Position of elbow in Z_0 direction with $\dot{\psi}$

Fig. 19 Virtual impedance

3・4 シミュレーション

提案した障害物回避方法の有効性を確認するためにシミュレーションを行った。マニピュレータの初期姿勢および障害物の位置を図 16 に示す。この初期姿勢において、座標系 ${}^0\Sigma$ と ${}^0\Sigma$ の各軸方向は一致している。各マニピュレータの初期関節角度 $q(0) = [0^\circ \ 60^\circ \ 0^\circ \ 60^\circ \ 0^\circ \ -30^\circ \ 0^\circ]^T$ ，障害物の高さ $z_o = 0.750[\text{m}]$ である。 M_j^* , B_j^* , K_j^* , W の値は、3・2 節のものと同一とした。仮想インピーダンスおよび仮想球に関する設定値を表 3 に示す。また、マニピュレータ A では $K_{\text{sgn}} = -1$ ，マニピュレータ B では $K_{\text{sgn}} = +1$ とした。 X_o 軸方向へ搬送物を並進搬送するシミュレーションを行った。人間の与える力を図 20 に示す。 X_o 軸方向のマニピュレータの手先位置の時間変化の様子を、 τ_j を付加しない場合（障害物無し）とともに図 21 に示す。両者は一致しており、 τ_j の有無に関わらず手先は同様の軌道上を移動することが分かる。 $\dot{\psi}_3$ の時間変化の様子を図 22 に示す。肘が障害物に接近すると仮想外力が発生するために、 $\dot{\psi}_3$ が変化していることが分かる。また、仮想外力発生後の波形は滑らかに変化しているため、関節角度の時間変化も滑らかなものになる。仮想球の頂点高さの時間変化を図 23 に示す。同図より、肘の高さが一旦障害物に接近した後に下がることで障害物を回避していることが分かる。また、図 22 と図 23 より、仮想外力が発生しなくなる、すなわち $\dot{\psi}_3 = 0$ となる位置まで肘の高さを下げていることも分かる。各時刻における搬送物とマニピュレータの状態を図 24 に示す。同図より、障害物を回避しながら搬送作業を行っている様子を確認することができる。

障害物がマニピュレータの横にあるときに、搬送物を Y_o 軸方向へ並進搬送するシミュレーションも行った。初期状態を図 25 に示す。図 26 に示すように、障害物回避を行わないとマニピュレータ A が障害物に衝突する。詳細は割愛するが、提案手法を用いた結果を図 27 に示す。同図より、マニピュレータ A のみが回避動作を行い、障害物を回避している様子を確認することができる。

Table 3 Values of virtual impedance and virtual sphere

$K = 0.2[\text{N/m}]$	$L_{\text{max}} = 0.070[\text{m}]$	$R_4 = 0.136[\text{m}]$
$D = 0.3[\text{Ns/m}]$	$L_{\text{min}} = 0.000[\text{m}]$

Fig. 20 Human force command in X_o direction

Fig. 21 Position of end-effector in X_o direction

Fig. 22 Waveform of $\dot{\psi}_3$

Fig. 23 Position of virtual sphere peak in Z_o direction

Fig. 24 Scene in simulation of Fig. 21

Fig. 25 Initial state of cooperative transfer in Y_O -axis direction

Fig. 26 Final state without obstacle avoidance

Fig. 27 Scene of cooperative transfer with obstacle avoidance in Y_O -axis direction

4. 結言

2 台の冗長マニピュレータと人間とによる協調搬送作業において、人間の思い通りに搬送物を操りながらマニピュレータに障害物を回避させるための制御方法を提案した。まず、人間から搬送物を介してマニピュレータの手先に与えられる力やモーメントの力指令に基づいて、マニピュレータが人間と協調して搬送作業を行う方法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認した。つぎに、冗長性を利用して障害物を回避するための制御方法を提案した。これら二つの方法を用いることにより、マニピュレータが障害物に接近した際に協調搬送しながらマニピュレータと障害物との衝突を回避することができることをシミュレーションで確認した。

今後の課題としては、 Y_o 軸以外の軸回りについても搬送物の姿勢を変える作業が行えるように制御方法を拡張することや、実機による検証実験が挙げられる。また、マニピュレータを移動ベースに搭載した移動マニピュレータに対し、本手法を拡張することも考えられる。

文 献

- (1) 稲葉肇, “産業用ロボットと作業環境”, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 5 (1999), pp. 637-642.
- (2) 稲垣荘司, “産業用ロボット技術の歩み”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 4 (2000), pp. 464-467.
- (3) 石井純夫, “食事支援ロボット「マイスプーン」”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 4 (2003), pp. 378-381.
- (4) 小澤壯治, “手術支援ロボットの研究開発と将来展望”, 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 3 (2009), pp. 284-286.
- (5) 向井利春, 平野慎也, 中島弘道, 吉田守夫, 郭士傑, 早川義一, “対象と全身接触を行う介護支援ロボットのための触覚情報を用いた操り動作”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 77, No. 782 (2011), pp. 3794-3807.
- (6) 佐藤侑, 郭士傑, 稲田誠生, 向井利春, “介護支援ロボット RIBA-II の動作設計と評価実験”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 789 (2012), pp. 1899-1912.
- (7) 井上博允, 比留川博久, “人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト”, 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 1 (2001), pp. 2-7.
- (8) 村上英之, 武居直行, 松本邦保, 鴻巣仁司, 藤本英雄, “自動車組立ラインのウィンドウ搭載支援ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 5 (2010), pp. 624-630.
- (9) 辻敏夫, ヤジディアハマド, “冗長マニピュレータのインピーダンス制御: 冗長性を利用した関節インピーダンスの調節法”, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 4 (1994), pp. 609-615.
- (10) Pholsiri, C., Rabindran, D., Pryor, M. and Kapoor, C., “Extended Generalized Impedance Control for Redundant Manipulators”, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 4 (2003), pp. 3331-3336.
- (11) Liao, C. and Donath, M., “Generalized Impedance Control of a Redundant Manipulator for Handling Tasks with Position Uncertainty while Avoiding Obstacles”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2 (1997), pp. 1073-1079.
- (12) 田窪朋仁, 荒井裕彦, 林原靖男, 谷江和雄, “人とロボットによる長尺物の協調運搬: 仮想非ホロノミック拘束による 3 次元空間内の制御手法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 68, No. 667 (2002), pp. 906-913.
- (13) 小菅一弘, 吉田英博, 福田敏男, 蟹谷清, 酒井勝, 針木和夫, “インピーダンス制御に基づく双腕マニピュレータの協調制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 3 (1995), pp. 404-410.
- (14) 吉川知功, 李家仁, M. W. M. G. ディサナヤカ, “冗長双腕マニピュレータ系の準最短時間軌道計画法”, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 4 (1995), pp. 532-538.
- (15) Liu, J. and Abdel-Malek, K., “Robust Control of Planar Dual-arm Cooperative Manipulators”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 16 (2000), pp. 109-119.
- (16) Caccavale, F., Chiacchio, P., Marino, A. and Villani, L., “Six-DOF Impedance Control of Dual-Arm Cooperative Manipulators”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 13, No. 5 (2008), pp. 576-586.
- (17) 小菅一弘, 須田理央, 風村典秀, 佐藤学, 角谷啓, “人と双腕型移動ロボット"MR Helper"による物体の協調搬送”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 69, No. 685 (2003), pp. 2308-2314.
- (18) 須田理央, 小菅一弘, 角谷啓, “オブジェクトインピーダンスに基づく人と双腕型移動ロボットによる物体の協調ハンドリング”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 70, No. 693 (2004), pp. 1388-1394.
- (19) Hogan, N., “Impedance Control: An Approach to Manipulation, Parts I-III”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 107 (1985), pp.1-24.
- (20) 小金澤鋼一, “冗長自由度を有するマニピュレータの逆運動の高速かつ安定な解法”, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 5 (1998), pp. 721-727.
- (21) 新井民夫, 太田順, “仮想的なインピーダンスを用いた複数移動ロボット系の動作計画”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 7 (1993), pp. 1039-1046.