

ロボットアームの二次元ハイブリッド協調制御に関する一考察

中村 壮亮*, 堀 洋一 (東京大学)

Consideration on Two-Dimensional Cooperation Control of Robot Arm

Sousuke Nakamura and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

In this paper, method for two-dimensional cooperation control of robot arm is proposed. In conventional research, it is said to be difficult to perform multidimensional cooperation control of robot arm. We solved the problem by applying force and moment control independently to horizontal and vertical direction. We examined the effectiveness of the proposed method by low-speed circular motion. This method can be easily expanded to three-dimensional motion and cooperation control with human.

キーワード: 二次元協調制御、力制御、モーメント制御、干渉力

(two-dimensional cooperation controll, force controll, moment controll, interference force)

1 序論

協調制御とは一般的に複数のロボットマニピュレータを用いた制御手法のことである。複数のマニピュレータを用いると単体では実現できない作業が可能となる。具体的にはロボットアームを用いた物体の把持などが可能となる。把持に際してはマニピュレータの手先となるエンドエフェクタの形状や把持モデルが重要であり、その形状としては本稿で用いるモデルと同様な板状のもの [1][2] や人間の手の様な構造をもった多指ハンド [3][4] など様々なものが研究されている。把持モデルとしては本稿のように搬送物を挟み込む場合や下から支えたりする場合などがある。

広範な作業が可能となる協調制御であるが、その実現にあたっては様々な問題も存在する。例えばマニピュレータが接触する環境に関する問題があげられる。これは環境モデルを正確に同定することや制御系に対して環境モデルに対するロバスト性を持たせることで解決できる。環境モデルに対してロバストな制御としては [6][7] などの研究が行われている。他にはマニピュレータの種類に応じた動作上の問題点もあげられる。ロボットには足が可動式のものや固定式のものがあり、可動式のものに関しては柔軟な位置制御が可能となる反面その重心位置をきちんと把握して転倒を防ぐなどといったことに注意する必要がある。さらに協調制御の力学的解析の正確性も問題である。協調制御における力学モデルは一般的に複雑であり、搬送物質量の各マニピュレータへの分配率など [5][8] を正確にモデリングするのは困難である。

このように制御系を構築すること自体が困難な協調制御系においては、多次元での協調制御となると十分な研究は行われていないのが現状である。そこで本稿では人間同士の協調搬送モデルから得た制御モデルをもとに二次元協調制御系構築の一手法を提案する。なお、本稿で提

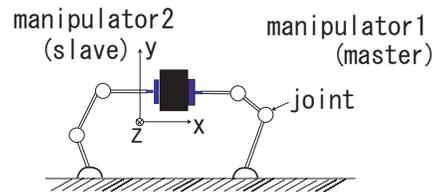


図 1: 協調制御系による物体搬送

Fig 1: Conveyance by cooperation control system

案する二次元協調制御の手法は容易に三次元実空間上での協調制御や人間とロボットの協調制御への拡張が可能であるという点でも応用性に優れている手法だといえる。

2 人間の協調搬送モデル

本稿では、板上のエンドエフェクタを持ち、2台の足が固定されたロボットを用いる協調制御系を扱うことにする。2台のマニピュレータを用いた協調制御における制御手法としては様々なものが考案されている。ここでは図1に示すように、マスターが位置を決定しスレーブがマスターの位置に追従するように制御されるマスター・スレーブ型制御と呼ばれる制御手法を扱う。

本稿におけるマスター・スレーブそれぞれの具体的な制御手法としては、マスター側は位置制御のみを扱い、スレーブ側は x 軸方向に力制御および y 軸方向にモーメント制御を用いて位置制御を行うハイブリッド制御を扱う。なお、本稿の二次元協調制御手法ではそのヒントを人間同士の物体搬送に得た。今2人の人間 A, B が手のひらを図2のような姿勢に向けて物体を把持していると

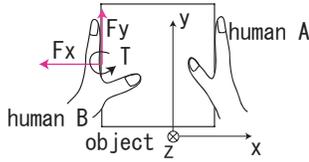


図 2: 人間による物体搬送

Fig 2: Conveyance by human

する。ここで、人間 B (スレーブに対応) は目を閉じているものとする。人間 A (マスターに対応) が xy 平面内の適当な方向へ物体を誘導したときに人間 B は何らかの物理量を感知してそれを位置修正情報として捉えられ

る。ここで、人間 B (スレーブに対応) は目を閉じているものとする。人間 A (マスターに対応) が xy 平面内の適当な方向へ物体を誘導したときに人間 B は何らかの物理量を感知してそれを位置修正情報として捉えられ

3 ロボットアームを用いた二次元協調制御系の構築

協調制御系の構築にあたって、各ロボットアームの軌道制御が行われている必要がある。ここでは二自由度制御系を適用したロバスト位置決めサーボ系として構成されているものとする。ロバスト位置決めサーボ系におけるパラメータ設定は文献 [9][10][11] を参考にした。

以下では x 軸方向力制御、 y 軸方向モーメント制御の順にその制御系の概要を説明する。特に y 軸方向モーメント制御については y 軸方向力制御に対する有効性についても考察する。

3.1 x 軸方向力制御

x 軸制御系に対するモデリングを図 3 のように行う。ここで図 3 において、インピーダンス制御モデルを適用したので環境はバネとダンパで近似されていて、 K, D はそれぞれ環境のバネ定数、ダンパ定数である。また、 m, x_{obj} は搬送物の質量、重心位置である。 x_1, x_2 はそれぞれスレーブの手先位置、マスターの手先位置である。 x_1, x_2 から F_1, F_2, x_{obj} までの伝達関数を求めると、

$$F_1(s) = \frac{K + Ds}{2} \frac{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} x_1 - \frac{1 + \frac{D}{K}s}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} x_2$$

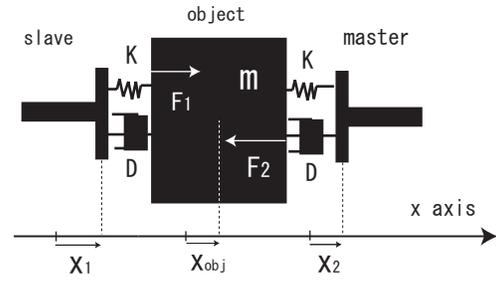


図 3: x 軸力制御のモデル

Fig 3: Force control model in x axis

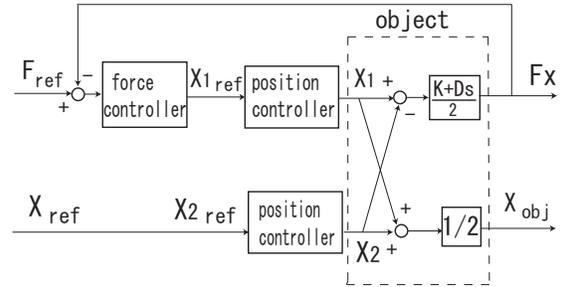


図 4: x 軸力制御のブロック線図

Fig 4: Block diagram of force control in x axis

$$F_2(s) = \frac{K + Ds}{2} \frac{1 + \frac{D}{K}s}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} x_1 - \frac{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{K}s^2}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} x_2 \quad (2)$$

$$x_{obj}(s) = \frac{1}{2} \frac{1 + \frac{D}{K}s}{1 + \frac{D}{K}s + \frac{m}{2K}s^2} (x_1 + x_2) \quad (3)$$

のようになる。ここで、 $\frac{D}{K}, \sqrt{\frac{m}{K}} \ll 1$ のときは

$$F_1(s) = F_2(s) = \frac{K + Ds}{2} (x_1 - x_2) \quad (4)$$

$$x_{obj}(s) = \frac{1}{2} (x_1 + x_2) \quad (5)$$

のように近似できる。よって制御ブロック線図は図 4 のように簡略化された形で表される。 $K > 10000, D \approx 0$ 程度の環境を想定しているのでこの近似は成立する。

3.2 y 軸方向モーメント制御

y 軸制御系に対するモデリングを図 5 のように行う。力覚センサで感知されるモーメント T に基づいてマスターとスレーブ位置の差 $\Delta y = y_2 - y_1 = 0$ とする制御系の実現を目指す。モーメント T には、環境の剛性によって発生するモーメント T_z および搬送物が傾くことによって搬送物の質量が力覚センサに及ぼすモーメントの変動分 ΔT があるが、制御系がうまく構成されていて ΔT が微小角に保たれているとすると、この変動分 ΔT は無視してよいとため $T = T_z$ と考えてよい。そこで Δy と $(1T_z)$ の間の関係を導出し、制御系の構築を考える。図 5 の

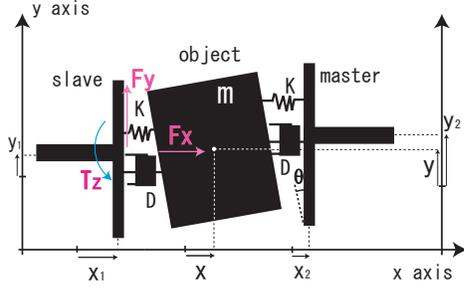


図 5: y 軸モーメント制御のモデル
Fig 5: Moment control model in y axis

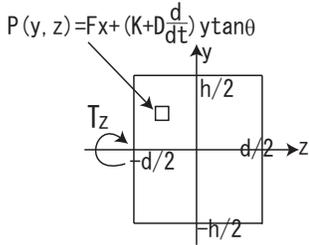


図 6: 圧力分布
Fig 6: Pressure distribution

ような微小角を持った状態において発生するモーメント T_z を計算する。

今、搬送物の奥行きを d [m]、高さを h [m]、幅を w [m] としたとき、搬送物が環境と接触する面(スレーブ側)における圧力分布モデルは図 6 のようになる。なお、図 6 の z 方向は搬送物の奥行き方向とする。このとき $\Delta y, \Delta z$ なる微小範囲でのモーメントは

$$\Delta T_z(t) = P_{(y,z)} y \cdot \Delta y \Delta z \quad (6)$$

で表される。よってこれを全領域で面積分して全体としてのモーメントは

$$\begin{aligned} T_z(t) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} P_{(y,z)} y \cdot dz dy \\ &= \frac{dh^3}{12} (K + D \frac{d}{dt}) \tan \theta \end{aligned} \quad (7)$$

と求まる。また、微小角度では $\tan \theta \approx \sin \theta \approx \frac{\Delta y}{w}$ なので、これを式 (7) に代入すると

$$G_{\Delta y T}(s) = \frac{T_z}{\Delta y} = \frac{d \cdot h^3}{12w} (K + Ds) \quad (8)$$

となる。これがマスタとスレーブの位置誤差 Δy からモーメント T_z への伝達関数である。この伝達関数を環境モデルとしてモーメント制御系を設計する。 y 軸モーメント制御系のブロック線図は図 7 のようになる。次に y 軸方向へ力制御ではなくモーメント制御を用いたことによる利点を考察する。

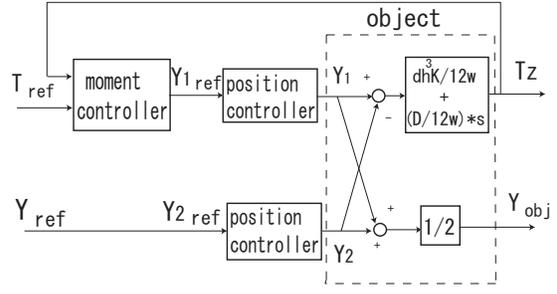


図 7: y 軸モーメント制御のブロック線図
Fig 7: Block diagram of moment control in y axis

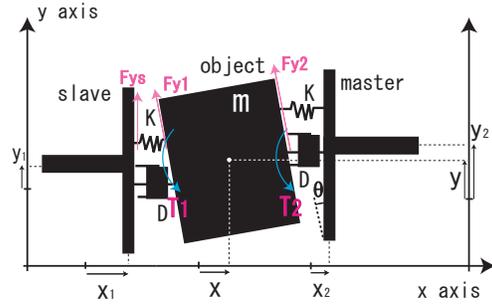


図 8: y 軸力制御のモデル
Fig 8: Force control model in y axis

3.3 y 軸モーメント制御系の優位性

y 軸力制御では、 y 方向への位置指令は摩擦と関係付けられることとなるが、この摩擦力は解析が非常に困難である。それは、静力学的なモーメントを扱ったモーメント制御の手法に比べて運動方程式に基づいた動力学的な扱いが必要になるためである。以下では y 軸方向への力学モデルを適用し、数式に基づいた定性的な考察を行う。

y 軸力制御系のモデルは図 8 のようになっており、この系の y 軸方向の運動方程式および回転運動の式は

$$m\ddot{y} = (F_{y1} + F_{y2}) \cos \theta - mg \quad (9)$$

$$I\ddot{\theta} = \frac{w}{2} (F_{y2} - F_{y1}) + T_1 + T_2 \quad (10)$$

となる。式 (9),(10) に

$$T_1 = T_2 = -T_z = -\frac{dh^3}{12} (K + Ds)\theta \quad (11)$$

$$y = y_2 - \frac{w}{2}\theta \quad (12)$$

および $\cos \theta \approx 1$ を代入して

$$m(\ddot{y}_2 - \frac{w}{2}\ddot{\theta} + g) = F_{y1} + F_{y2} \quad (13)$$

$$I\ddot{\theta} = \frac{w}{2} (F_{y2} - F_{y1}) - \frac{dh^3}{6} (K\theta + D\dot{\theta}) \quad (14)$$

となる。このモデルでは $I = \frac{mhw}{6}$ であり、 \ddot{y}_2 さえ分かれば式 (13),(14) から F_{y2} を消去して θ と F_{y1} との間の

微分方程式が

$$F_{y1} = \frac{m}{2}(\ddot{y}_2 + g) - \left(\frac{mh}{6} + \frac{mw}{4}\right)\ddot{\theta} - \frac{dh^3D}{6w}\dot{\theta} - \frac{dh^3K}{6w}\theta \quad (15)$$

のように得られる。力覚センサから得られる y 軸方向の摩擦力 F_{ys} は、 $F_{ys} = -F_{y1} \cos \theta \simeq -F_{y1}$ であり、この式と $\theta \simeq \frac{\Delta y}{w}$ を式 (15) に代入して Δy から F_{ys} への伝達関数 $G_{\Delta y F}(s)$ は

$$G_{\Delta y F}(s) = \frac{F_{ys}}{\Delta y} = \left(\frac{mh}{6w} + \frac{m}{4}\right)s^2 + \frac{dh^3D}{6w^2}s + \frac{dh^3K}{6w^2} \quad (16)$$

と求まる。また式 (16) を用いて $F_{ys}(s)$ の式は

$$F_{ys}(s) = G_{\Delta y F} \Delta y - \frac{m}{2}(y_2 s^2 + g) \quad (17)$$

と求まる。式 (17) の右辺第 2 項は慣性力項および重力項に対応している。式 (17) から分かるように慣性力項を考慮するとマスターの位置指令の加速度 \ddot{y}_2 をスレーブの力制御系に与えることが必要だといえる。つまり加速度運動ではマスターの位置指令を通信する必要があることになる。これは、マスターの位置の通信を行わずに制御系を実現する本稿における x 軸力制御や y 軸モーメント制御に比べてシステムの通信にかかる時間遅れやシステム自体のコストの面で望ましくないと考えられる。また、通信を行ったとしても式 (16) で表される伝達関数モデル自体が複雑であるため摩擦力の解析は容易ではない。以上の点から y 軸方向への制御手法としては y 軸モーメント制御系のほうが y 軸力制御系に比べて有効な制御手法であると考えられる。

4 各軸の干渉問題も考慮した二次元円運動シミュレーション

今までは各軸の制御系について独立に扱った。しかし、二次元協調制御系のような多次元協調制御問題を厳密に扱うには各軸の制御系の干渉問題を考えなければならない。そこで以下では各軸制御系の干渉問題について考察する。

y 軸制御系に関しては式 (8) に基づいたモーメント制御を行うものであり、物理モデルには x 軸力制御系の干渉はないと考えられる。しかし、 x 軸力制御系に対しては厳密には図 9 から分かるように y 軸方向制御系で扱った摩擦力 F_{y1} の x 軸方向成分が影響を及ぼす。つまり干渉も含めた x 軸方向にかかる実際の力を F_{xi} とすると、

$$F_{xi} = F_x - F_{y1} \sin \theta \simeq F_x - F_{y1} \theta \quad (18)$$

となる。ここで式 (15) より、

$$F_{y1} \theta = \frac{m}{2}(\ddot{y}_2 + g)\theta - \left(\frac{mh}{6} + \frac{mw}{4}\right)\ddot{\theta} - \frac{dh^3D}{6w}\dot{\theta} - \frac{dh^3D}{6w}\theta^2 \quad (19)$$

である。今、 x 軸力制御・ y 軸モーメント制御を用いた二次元協調制御系においてこの干渉項を無視する場合と

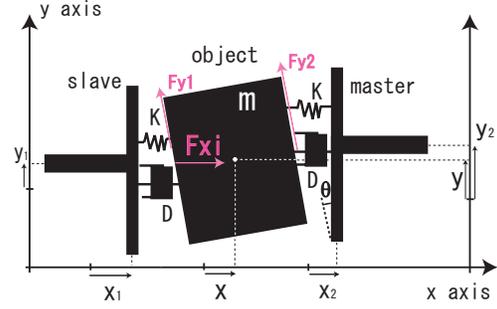


図 9: 力制御の干渉モデル

Fig 9: Interference of force control system

考慮する場合の応答の比較を行った。ここで軌道制御系の応答特性は

$$G(s) = \frac{1}{(1 + \tau_r s)^2} \quad (20)$$

で表されるものとし、シミュレーションに用いた定数は以下のように設定した。

$K = 15000$ [N/m], $D = 300$ [Ns/m], $\tau_r = 0.01$ [s]
 $F_{ref} = 50$ [N], $T_{ref} = 0$ [Nm]
 $w = 0.15$ [m], $d = 0.15$ [m], $h = 0.15$ [m], $m = 3.0$ [kg]
 F_{ref}, T_{ref} は力目標値、モーメント目標値であり、 w, d, h, m はそれぞれ搬送物の幅、奥行き、高さ、質量である。また x 軸力制御器および y 軸モーメント制御器には

$$C(s) = A \frac{1 + \tau s}{\tau s} \quad (21)$$

で表される PI 制御器を用いた。 x 軸力制御器では $A_x = 5.0 \times 10^{-4}$, $\tau_x = 0.25$, y 軸モーメント制御器では $A_y = 2.0$, $\tau_y = 0.25$ とした。マスター位置入力としては x 方向入力が図 10(A), y 方向入力が図 10(B) のようなものを考える。この入力は $0 \sim 2$ [s] の間は安定把持状態になるまでマスターは停止し、 $2 \sim 3$ [s] の間は x 正方向に速度 5 [cm/s] で動き、 $3 \sim 4$ [s] の間はまた停止し、 $5 \sim 15$ [s] は xy 平面内で半径 5 [cm], 周期 4 [s] の円運動となる。マスター位置入力を xy 平面で図示したものが図 10(C) である。

ここで、干渉を無視した場合のスレーブ位置出力は x 方向は図 11(A), y 方向は図 11(C) のようになった。また、力応答は図 11(B), モーメント応答は図 11(D) のようになった。

これに対して干渉を考慮した場合はスレーブの x 方向位置出力は図 12(A), 力応答は図 12(B) のようになった。また、干渉力そのものの応答は図 12(C) のようになった。

最後に干渉力を無視した場合と考慮した場合のスレーブ位置応答を xy 平面で図示した。これが図 13 である。

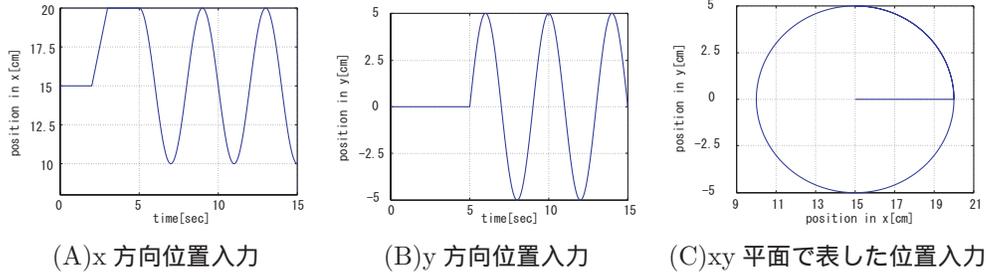


図 10: マスター位置入力

Fig 10: Position input of master manipulator

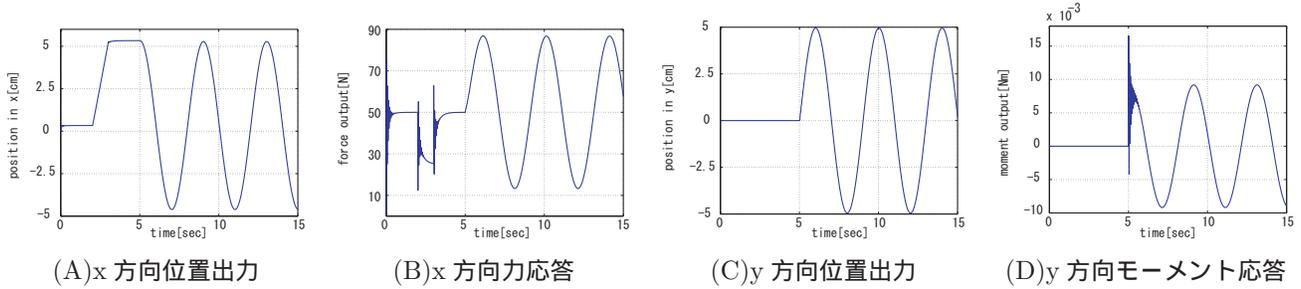


図 11: スレーブ出力 (干渉補償無)

Fig 11: Position output of slave manipulator without interference compensation

図 12(C) より $-0.2 \sim 0.2$ [N] の干渉力が発生していることが分かる。図 11(A) と図 12(A) の比較から、この程度の干渉力が入ったとしても x 軸力制御系の位置出力には影響がないことが分かる。また、円運動移行時 (5[s]) での干渉力は 0.3 [N] 程度と多少大きい値であるがこれは y 方向運動の加速度が不連続であることによる衝撃力である。この影響も図 11(B) と図 12(B) の比較から無視できる程度であることが分かる。以上より干渉力が制御系に与える影響はほぼ無視できることが示された。従って低周波円運動に対しては干渉力を無視した各軸独立な制御系によって十分な追従性能を得られることが示された。

図 13(A) と図 13(B) の比較からも干渉力を考慮することによる二次元平面運動の変動はほとんど見られないことが分かる。円運動移行時には干渉力として衝撃力が加わる影響でわずかな差が見られるがこれも微小なものである。また、 x 方向は 0.3 [cm] ほどの誤差が生じている。これは静止状態において 50 [N] の力が加わる時の定常誤差が $x = \frac{F_{ref}}{K} = \frac{50}{15000} = 3.33 \times 10^{-3}$ [m] = 0.33 [cm] であることによるものである。

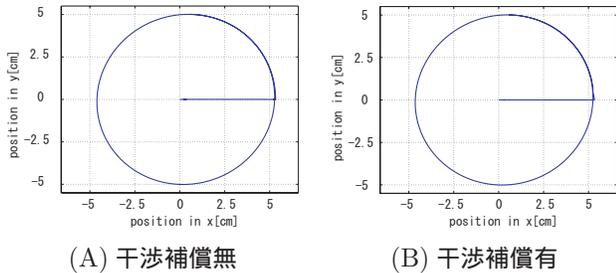


図 13: xy 平面で表したスレーブ位置出力

Fig 13: Two-dimensional position output of slave manipulator

5 結論と今後の課題

協調制御の手法やエンドエフェクタの種類によって様々な把持・操りの手法などが研究されている。しかし、多次元協調制御に関する研究は少ない。そこで本稿では二次元協調制御の手法を提案し、その有用性を示した。そこで x 軸方向に対しては従来から提案されている簡単な力制御系を扱うことにした。また y 軸方向に対してはコンプライアンス制御の制御対象として摩擦力およびモーメントの二つの物理量が考えられたがここではモーメント制御系を扱うことにした。この y 方向モーメント制御系こそが本稿で新しく提案した手法である。 y 軸方向に対して摩擦力に基づいた力制御ではなくモーメント制御を用いた理由としては以下の 4 点が考えられた。

- ・ y 軸モーメント制御系では環境が近似的に簡単な形の線形化モデルとなる
- ・ y 軸モーメント制御系の線形化モデルは x 軸力制御系

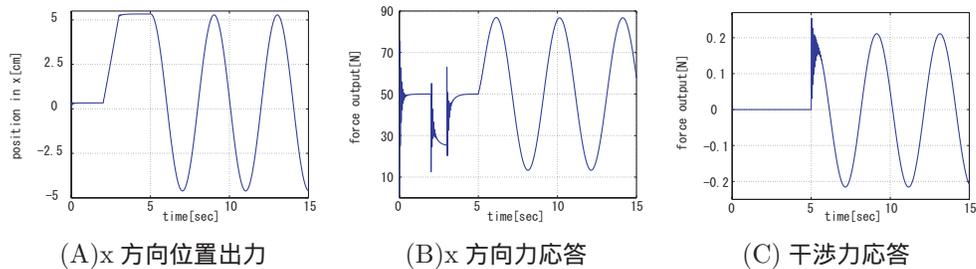


図 12: スレーブ出力 (干渉補償有)

Fig 12: Position output of slave manipulator without interference compensation

の環境モデルと形が同じである

・ y 軸力制御系では摩擦力の正確な計算は困難であり非線形なモデルとなる

・ y 軸力制御系ではマスターの加速度情報が与えられなければ正確な制御ができない

本稿では最後に二次元協調制御系の応答特性をシミュレーションモデルを用いて考察した。 x 軸方向力制御系と y 軸モーメント制御系の干渉問題を考慮した二次元協調制御系と無視したものにおいて円運動に対して応答特性の比較を行った。その結果、周期 4[s], 半径 5[cm] のような低速・低周波の二次元円運動においては干渉の影響によらず各軸独立な制御が可能であることが分かった。

今後の課題としては

- 干渉補償を考慮した高速二次元協調制御系の設計による高速搬送の実現
- 速度や加速度が不連続となるような急な動き出し時に発生する衝撃力の低減を行う制御系の設計

などが期待される。

参考文献

- [1] 向山 俊和: “ ロバストな位置・力制御による双腕協調制御の実現”, 卒業論文, 東京大学工学系研究科, 1996.
- [2] 三平 満司, 水野 伸太郎, 石川 将人, 古賀 雅伸: “ 2 板間に挟まれて運動する剛球の位置制御”, 日本ロボット学会誌 Vol.14, No.8, pp.1237 ~ 1242, 1996.
- [3] 金子 真: “ 多指ハンド”, 日本ロボット学会誌 Vol.16, No.7, pp.889 ~ 892, 1998.
- [4] 前川 仁: “ 触覚情報を利用した多指ハンドによる把握・操り”, 日本ロボット学会誌 Vol.18, No.6, pp.776 ~ 781, 2000.
- [5] M.Mozasser Rahman, Ryojin Ikekura, Kazuaki Mizutani: “ Investigation of the Impedance Characteristic of Human Arm for Development of Robots to Cooperate with Humans”, *JMSE International Journal SeriesC*, Vol.45, No.2, pp.510 ~ 518, 2002.
- [6] 志村 康治: “ ロボットマニピュレータにおける力制御のロバスト化と衝突過程の制御”, 修士論文, 東京大学工学系研究科, 1992.
- [7] 吉川 恒夫, 横小路 泰義, 細谷 徳男, 井村 順一: “ 環境とオペレータ特性の不確かさを考慮したマスター・スレーブシステムのロバスト制御”, 日本ロボット学会誌 Vol.14, No.6, pp.836 ~ 845, 1996.
- [8] 斉藤 保孝: “ ロボット制御の実際”, 計測自動制御学会, 1997.
- [9] 堀 洋一, 大西 公平: “ 応用制御工学”, 丸善, 1998.
- [10] 梅野 孝治: “ 「機械設計」第 35 巻第 8 号別刷”, 日刊工業新聞社, 1991.
- [11] 金子 智朗: “ ロバスト位置決めサーボ系による多軸マニピュレータの運動制御”, 修士論文, 東京大学工学系研究科, 1991.
- [12] 原 康夫: “ 基礎物理学シリーズ・力学”, 東京教学社, 1992.
- [13] 原 康夫: “ 理工系の基礎物理・力学”, 学術図書出版社, 1998.