博士論文

双腕ロボットによるプレート 2 軸旋回運動制御の運動誤差測定とその改善に関する研究

2013

呉　魏

目　　次

符号

1. 座標系

Σ_R	空間に固定された座標系
Σ_m	プレートに固定された座標系
Σ_B	対象物の重心位置に固定された座標系
${}^mX_B, {}^mY_B$	Σ_m から見た Σ_B 位置

2. パラメータ

O	ダブルボールバー(DBB)の回転中心
R	ダブルボールバー(DBB)の回転半径
ΔR	ダブルボールバー(DBB)の伸縮量 (各平面に生じる DBB 誤差)
Q'	ダブルボールバー(DBB)の移動指令
Q	ダブルボールバー(DBB)の実際移動点
J1～J15	ロボットの各関節
P_i , U_j	プレート上のある点の Z_m 方向の荷重と変位

K_{ij}	剛性
r	ボールの半径
φ	ボールの回転角
M	ボールの質量
R_{c}	ボールの転がり円軌道の半径
f	摩擦力
D	減衰係数
I	球心まわりの慣性モーメント
θ	プレートの傾き角度
θ_0	プレート傾きの最大角度
θ_{x}	プレートの $\mathrm{X_m}$ 軸まわりの傾斜角
θ_{y}	プレートの $\mathrm{Y_m}$ 軸まわりの傾斜角
θ_{x0}	プレートの $\mathrm{X_m}$ 軸まわりの最大傾斜角
θ_{y0}	プレートの $\mathrm{Y_m}$ 軸まわりの最大傾斜角
$\Delta\theta$	プレートの角度誤差
t	時間
D_{M}	質量に対する減衰係数 $5D/7M$
ω	角速度

f_f	運動の周波数
T	運動の周期
α	位相遅れ
ε	両回転軸の最大角度の比
Φ	アクリルパイプの直径
h_1	円筒面からの初期高さ
b_n	円筒面上の円弧長さに換算した各片振幅
δ	対数減衰率
ζ	減衰比
k_k	円筒振り子の等価ばね $5Mg/7\{(\Phi/2)-r\}$
k'_k	$M(d\theta/dt)^2-5Mg/7\{(\Phi/2)-r\}$
L	ボールの移動距離
a_a	重心の斜面方向の加速度
Δr_1	実軌跡の最大誤差
Δr_2	だ円軌跡の長軸と短軸の差
F_{Ball}	中実ボールに加える面内方向の駆動力 $5/7M\mathrm{g}\theta$

F'_{Ball}	中空ボールに加える面内方向の駆動力 $5(r^3-a^3)r^2/(7r^5-5a^3r^2-2a^5)Mg\theta$
${}^{\mathrm{m}}V_{\mathrm{B}}$	ボールの中心の速度
X_{R1}	ボールの中心の運動誤差
X_{R2}	プレート面内のボールの転がり運動の誤差
Z_{B}	地面に対する転がり運動中のボール中心の高さ変化
F	ボールのプレート面内力
A	ボールと水平面接触の弾性変形により生じる盛り上がり点
e	ボールの中心を通る鉛直線から A 点までの距離
r_{R}	ボールの中心を通る水平線から A 点までの高さの差
μ_{r}	転がり摩擦係数
δ	画素 1 辺の長さ

β	転がり運動だ円軌跡の長軸と X_m 軸のなす角度
R_1	楕円の長軸/2
R_2	楕円の短軸/2
L_1～L_8	ロボットの各リンクの長さ
N	フーリエ級数の展開次数
a_1	プレートの幅
a_2	プレートの長さ
c_1，c_2	プレートのクランプ点
θ_{i}	各軸の指令角度
$a_{1\mathrm{MAX}}$	支持可能なプレートの最大幅
$a_{2\mathrm{MAX}}$	プレートの最大長さ
rr	プレート中心の移動範囲の半径
ΔR_{MAX}，ΔR_{MIN}	不連続な点の半径誤差 ΔR の最大値と最小値
$P_i(\theta_{\mathrm{xi}}, \theta_{\mathrm{yi}})$	プレートの指令角度ベクトル
$P_i'(\theta'_{\mathrm{xi}}, \theta'_{\mathrm{yi}})$	プレートの実運動角度ベクトル
$P_i''(\theta''_{\mathrm{xi}}, \theta''_{\mathrm{yi}})$	プレートの実教示角度ベクトル

$G_{\mathrm{x}}, G_{\mathrm{y}}$	サーボ系のゲイン
α_{y}，α_{x}	サーボの位相遅れ
l	ダブルボールバー(DBB)の長さ
α_1～α_4	J2，J6 と J9，J13 で構成される角度
(a, b)	プレート中心の座標
$(X_p$，$Y_p)$	プレート上でボールを操作可能な範囲
$\Delta\theta_{\mathrm{x}}$，$\Delta\theta_{\mathrm{y}}$	プレートの軸まわりの角度誤差
E	誤差係数行列
$\varepsilon_{\mathrm{xx}}$～$\varepsilon_{\mathrm{yy}}$	誤差係数
$(\delta_{\mathrm{mxi}}$，$\delta_{\mathrm{myi}})$	計測誤差

第 1 章　緒　　論

本章では, 新興国の観点も含めてまず本論文の産業用ロボットに関する研究背景を述べ，さらに双腕ロボットによる作業用プレートの高度な操り動作について今日までに行われてきた研究の概要を述べることにより，本研究の目的を明らかにし，本論文の位置づけを明確にする．さらに，目的を達成するための本論文の構成および概要を述べる．

1. 1　研究の背景および目的

新興国の一例として中国における実情として人件費の高騰を背景に，産業用ロボットの世界的な需要が急増している．その一方，中国の産業用ロボット業界は日本や欧米のメーカーに市場を独占されているのが現状で，国内メーカーのシェアは 10%にも満たない．しかし，需要の増大とともに国内メーカーの技術開発も進み，ロボットの性能が向上して，市場の評価が上がってきた．中国の産業用ロボット市場の現状は，日本の 1980 年代の状況と似通っていると言われる．日本も当時，人件費の高騰で急速に機械化が進み，10 年間のロボット業界の年間平均成長率は 50%近くにまで達した．日本の例を見ても，中国の産業用ロボット業界が今後 2，3 年のうちに爆発的な成長を遂げることは間違いないと考えられる(1)．また，それによって人口比で考えると過去の日本の 5〜10 倍の市場規模になるものと予想される．

さらに中国工程院は,『わが国の溶接製造業の現状および発展』のサマリー・レポートで，初期段階は「アメリカモデル」を採用し，成熟したら少しずつ「日

本モデル」に近づけていくと考えている．世界各国の産業用ロボットの発展を総合的に見ると，日本モデル，ヨーロッパモデル，アメリカモデル，この三つの発展モデルに分類される．日本モデルの特徴としては，各部署がそれぞれの工程を担当し，ターンキー・プロジェクト (Turnkey Project) を完成する．製造会社は新型ロボットの開発と高品質な製品の大量生産を主要目標とし，設計会社が各業界に求められるロボットを設計し，ターンキー・プロジェクトを果たす．ヨーロッパモデルの特徴は，一括したターンキー・プロジェクトである．すなわち，ロボットのシステム設計から製造までのすべてをロボットメーカー自身がやり遂げる．アメリカモデルの特徴としては，設計と調達のセットである．アメリカ国内において，産業用ロボットの製造は基本的に行わない．通常，企業は必要とするロボットを輸入し，自社で更に必要な周辺機器を設計，製造し，ターンキー・プロジェクトを完成する(2)．中国は，地理的な面も考慮すると日本モデルまたはヨーロッパモデルで発展すると考えられ，どちらにしてもロボットの技術開発が不可欠になるものと考えられる．

「ロボット」が人間の実世界に出現したのはアメリカで 1962 年に AMF 社が「バーサトラン」，ユニメーション社が「ユニメート」という商品名の産業用ロボットを発表した．「産業用ロボット」というものは，人間の作業そのものを機械に置き換えるという今までにない発想の機械であった．人間の手，腕の動きを模倣する一本の腕を持ち，この腕を使って工場の中で人間に代わって色々な作業をしてくれる道具であった．産業用ロボットを産業として確立するために機械技術，エレクトロニクス，コンピュータ，ソフトウェア，サーボ，センサ，利用技術などの色々な技術分野が工業レベルで存在し，それらを総合できる環境が必要である．産業用ロボット単体を現場に持ち込むだけでは何の仕事もできない．利用技術，生産技術，現場技術の裏づけがあって始めてロボットを生

産活動の中で活用することができる．また，ロボットを実際に使用してみるといろいろな不具合や欠陥が発見されたが，日本のユーザはメーカーとお互いに切磋琢磨して問題点を解決して行った．その後，油圧，空気圧駆動から電気式サーボモータへの転換，マイクロプロセッサの導入による飛躍的な機能の向上，多関節という新しいロボット構造の登場，信頼性の向上などという産業用ロボットの発展により産業用ロボットはますますその適用の可能性を拡大していった[(3)]．

一方，初期の産業用ロボットとして，厳密にはティーチングプレバックという方法で動作する産業用の機械を目指す場合が大部分だった．しかし，最近では人間の代わりに作業をする機械としての役割が重視されるため，ある程度自律的に動作する人間の腕に似た機械として解釈されるのが一般的である．産業用ロボットは自動制御を行う点で CNC 工作機械とよく似て，FA 設備として同じような印象を受けるが，コンセプト的には，産業用ロボットはティーチングプレバックを行う点で区別される場合が多い．産業用ロボットも CNC 工作機械もプログラムを実行していくことで作業を行う．しかし，産業用ロボットは自律的に動作することが可能であり，その点が CNC 工作機械とは大きく違っている．具体的に言えば条件判断命令を持つ．すなわち，状況の変化を検出して動作を変化させたり，適切なプログラムを選択したりすることができる．そのため，多少歪んだ物でもそれなりに加工したり搬送したりすることができる．CNC 工作機械は正確に物を加工することを目的とする装置であるため，条件判断命令を持たないか，あっても異常の検出程度にしか使わないのが普通である．ロボットは NC 制御ではないため，計算上の座標空間で動作して，その動作には常に無視できない誤差がある．しかし，ロボットは誤差のあるものを加工対象として開発された機械で，センサで状況を検出し柔軟な動作をすることを前提に

作られていることである．すべてのロボットがロボットとしての機能を必要として導入されているわけではなく，単に動作の自由度の高さや，品質の向上を目的としてロボットが導入されることも多い[4]．　これが中国を含む新興国における現状である．

一方で近年，日本の FA(Factory Automation)現場において 5 軸制御マシニングセンターや新しい産業用ロボットの応用範囲が拡大するにつれ，複雑な旋回運動をテーブルに与えるための運動制御の高精度化[5]が望まれており，工作機械と産業用ロボットの役割分担も大きく変化しつつある．すなわち日本の最新 FA 技術において，工作機械には自律的な制御性，ロボットには NC 制御による運動の高精度化が求められている．従来は不可能とされていたロボットにおける運動精度の向上が日本の FA 産業の世界に向けた優位性になりつつある．運動精度を改善するために[6]は，それらの計測および評価の技術が不可欠である．その中でも輪郭運動精度が求められる場合には，2 軸以上の制御軸の同期精度を評価する必要がある．そこで，ダブルボールバー (DBB) を用いて直進 2 軸と旋回 1 軸の同期運動精度を調べた研究[7]~[11]などは工作機械を対象にして多く見られる．しかし，その多くは直進軸の運動が含まれた例であり，旋回軸のみの同期運動精度を調べた例はほとんどない．また，双腕ロボットのような，両腕の高度な協調動作が求められる新型産業用ロボットに適用した例はない．また，CNC 技術の発展により多軸の同期制御技術が具現化され，多関節ロボットアームを各腕として構成された双腕ロボットが実用化され，新しい FA 技術への応用が期待されてきている．

DBB 法では 2 点間の距離を計測するスケールを備えた伸縮するバーの伸縮変化量より 2 軸同時制御における運動精度を評価する．しかし，その原理上、直進軸の運動なしには計測は不可能であった．旋回 2 軸の同期制御の精度を計測

するには，例えば、高精度ジャイロセンサを用いる方法が考えられる．しかし，同センサは重く，大きいためコンパクトロボットには適用できない．高価でもあり実用的ではなかった．センサレスで，FA の現場でも容易かつ簡単に旋回運動の診断ができるシステムが望まれている．

本研究の目的は，双腕で作業プレートを支持する（ヒトの動作解析に基づく）ことで閉リンク機構を構成し，作業プレートを操ることで十分な支持剛性を維持しながらプレート上での柔軟な作業空間を実現することである．その結果として, ロボットで従来の工作機械の NC 制御の運動精度に近い性能を具現化することである．そのため，双腕ロボットの双腕協調制御による複雑で高精度な 2 軸旋回運動を，極めて簡単で，しかし信頼性の高い精度診断に基づき達成する[12]．運動精度の改善のためプレート上で球の転がり運動軌跡をコンピュータシミュレーションにより解析することで，同時 2 軸制御の旋回運動の制御精度を評価する手法を確立する．

1.2　本論文の構成

本研究の内容は，次の通りである．

第 1 章では，本章であり，目的および背景と構成について述べている．

第 2 章では，双腕ロボットの新しい応用とその運動精度の向上を目指した最初のステップとして，双腕で作業プレートを支持してエンドエフェクターとして操る手法の有効性を検討した．特に同時 14 軸制御により作業プレート上に球を定常状態で転がり等速円運動させる動作に取り組み，プレート上のボールの転がり運動制御の基本理論について提案し，その結果を実験により検証した．

第 3 章では，双腕ロボットに作業プレートを支持して，そのプレート上でボ

ールが等速転がり円運動するように双腕の協調で同時 2 軸の旋回運動する指令を与えた．さらにその時に生じるボールの過度応答の状態からの運動軌跡を解析する理論を提案した．さらにその理論に基づくシミュレーション結果と実測の結果より，ロボットの運動精度の改善のための指針を示した．

第 4 章では，現場で簡易的に 2 軸同期の旋回運動の運動誤差を診断する方法として，作業プレート上に円軌道のボールの転がり運動を創成し，その転がり軌道の基準円に対する誤差を用いる新しい体系的な手法を提案した．さらに，使用するボールの種類の影響およびプレートの中心軸と旋回運動の軸が一致しないオフセット角度誤差について考察し，双腕ロボットを用いての実験よりそれらの知見の検証を遂行した．

第 5 章では，作業プレート上で転がり運動させるボールの摩擦係数の違い，慣性モーメントと質量の比が異なる場合についての影響を考察し，提案する手法の運動誤差の計測感度について検討した．さらに，それらの結果をまとめ，提案する運動誤差の診断手法の一般性を拡張した．

第 6 章では，産業用双腕ロボットの正面に作業プレートを保持する姿勢の中で，プレートの基本高さは一定にしたまま水平方向に保持位置を変化させてボールの転がり運動を操る場合について調べた．特に，工場現場で産業用ロボットに用いられている Point to Point 指令（ティーチング・プレイバック方式による作業指令）をベースにして指令角度を三角波で与えた場合についてのプレートの旋回運動の誤差を考察して，双腕ロボットによるプレート支持の特徴に起因する現象を解明した．さらに誤差要因の DBB 診断に基づき，現場で容易に補正するための方法を検討した．

第 7 章では，本研究で得られた結論を述べた．

第 2 章　プレート上のボールの転がり運動制御の手法と基礎理論

2. 1　緒　　　言

生産システムは，少品種多量生産から FMS (Flexible Manufacturing System) などに代表される多品種少量生産，さらに高度な変種変量生産へ発展してきた．その中で，FA(Factory Automation) の技術の重要性が益々増大している．ところで，CNC 工作機械の役割は工作物を載せたテーブルの運動制御による生産作業の自動化技術の一種類と考えられる．工作機械の CNC 技術化は 1949 年にアメリカ MIT で具現化され，その後は並進 3 軸の運動を制御する 3 軸制御マシニングセンタとして発展し，現在は数 μm オーダの高い運動精度が実用的に達成されている．その一方，柔軟な生産システムを具現化するために，工作機械にも産業用ロボットと同じように旋回運動機能の具備を求めるニーズが高まり，近年は並進 3 軸に回転 2 軸の運動を制御する 5 軸制御マシニングセンタが実用化され，広く普及し始めている．しかしながら，マシニングセンタのテーブルはガイド構造をベースにしたテーブルの運動制御であるため，構造的に旋回軸の旋回中心の位置が固定され，作業の自由度が大きく制限されている(13)．ガイド構造を持たないマシニングセンタとしては，ボールネジと多自由度な球面ジョイントを組み合わせてテーブルを支持するパラレルメカニズム方式も一部で実用化されているが，ジョイントの干渉によるマシンの大型化や精度校正の不確実さなどの問題点が顕在化している(14)．一方，多関節ロボットによる運動は作業の自由度が大きいが，多軸同時制御時の運動精度が十分でなくさらに支持剛

性も低いためにテーブルを保持し，そのテーブル上で作業を遂行するような動作には向かないとされてきた．また運動方向の反転時に生じるロストモーション運動等に起因する不連続性などで人の様な滑らかな作業も難しいとされてきた．しかしながら近年，CNC 技術の発展により高精度な多軸の同期制御技術が具現化され，多関節ロボットアームを各腕として構成された双腕ロボットが実用化されたことにより，ロボットによるテーブルの操り運動も新しい FA 技術としての応用が期待されてきている．

双腕ロボットにおいて，双腕の先端を結合すると閉リンク機構を構成することになり，従来の産業用ロボットによるテーブル支持に比べその剛性の向上が可能である．双腕の協調作業により色々な作業が考えられるが，作業空間における障害物回避 [(15)~(16)]や柔軟物の把持 [(17)~(21)]さらには経路計画 [(22)~(23)]などの研究はなされているが，支持剛性の向上と多軸の協調制御特性をエンドエフェクターとして積極的に活用したものには取り組んだ例はない．

そこで本章[(12)(30)]では，双腕ロボットの基本運動性能を調べた後，それに作業プレートを支持することで閉リンク機構を構成し，エンドエフェクターとして十分な支持剛性を維持しながら，作業プレートを操ることで，プレート上で柔軟な作業空間を実現することを試みた．また不安定な物体を扱う例として，プレート上を転がるボールの基本方程式とそのボールを転がり円で運動制御するための基礎理論を示した．また，作業プレート上の画像情報からフィードバックする制御も考えられるが，本章では最初のステップとして両腕の同時 14 軸制御における基本性能をベースにして，作業プレートの支持方法を考察し，さらに支持した作業プレートに基本方程式に基づき双腕の協調制御による旋回運動を与えることで，プレート上に定常的にボールのなめらかな転がり円運動を実現できることを示した．さらにプレート操り運動の誤差の影響についても考察

した．

2. 2　実験装置および方法

2. 2. 1　双腕ロボットとセンサーの基本性能

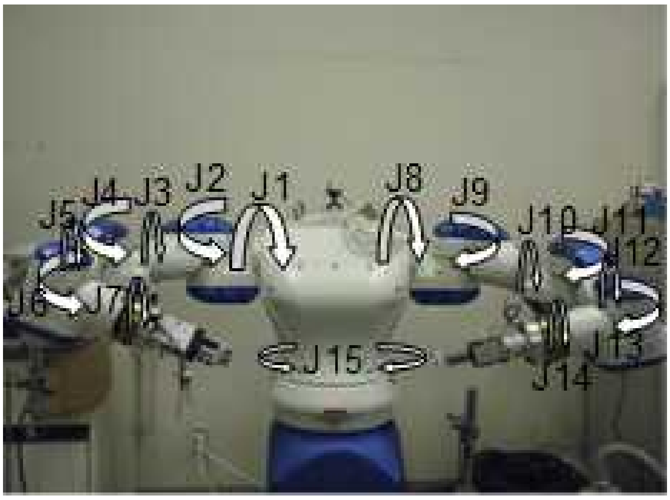
検証用の実験で使用したロボットは安川電機製の双腕ロボット MOTOMAN-DIA10（図 2.1(a)）である．人の上半身をイメージして開発され，成人男性とほぼ同じサイズである．各腕に 7 関節を持ち，人の腕に近い動きを実現することが可能である．さらに各関節の動作範囲は人のそれを大きく上回り，取り得る姿勢の自由度は人以上である．さらに胴体のひねりを考えたボディ旋回軸を 1 軸装備し，合計 15 自由度制御（図 2.1(a)中の J1～J15）である．各腕は 98kgf（10kg），両腕 196kgf（20kg）の重量物を持つことができる．そこで図 2.1(b)に示す座標系（右手座標系，プレートに固定）を設定して，作業プレートを双腕で支持しながら操り，その X_m 軸・Y_m 軸まわりで作業プレートに旋回運動を与えた．また，実験におけるプレート上のボールの運動軌跡は，ビデオカメラで動画を記録した後に画像処理にて解析した．カメラは図 2.1(b)に示されるようにプレートに固定され，その真上 60cm に設置した．使用したカメラはフ

Table 2.1 Specification of sensor

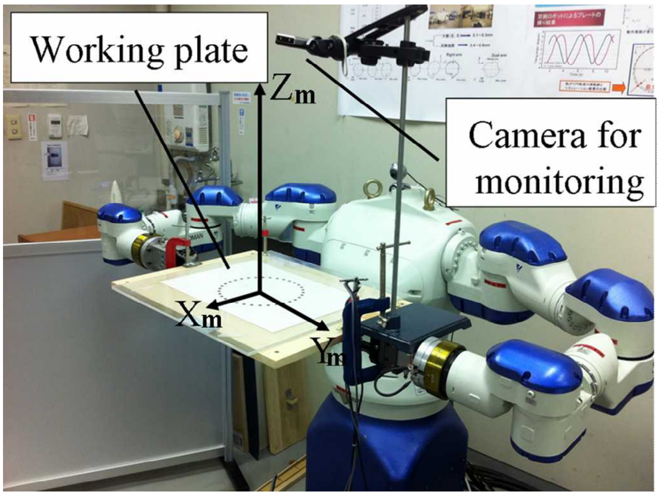
	Unit	CXTA02
Measuring range	°	±20
Measurment axis		Roll・Pitch
Resolution	° rms	0.05
Sensitivity	mV/°	35±2
Horizontal voltage		2.5±0.15
Frequency band	Hz	50
Nonlinearity	°	0.4
Initial stable time	second	0.2
Cross-axis sensitivity	%	<5
Power supply voltage	DCV	6～30
Consumption current	mA	8

ジフィルム社製 FinePix Z200, 動画サイズ 640×480 画素で, 空間分解能は 0.63mm/画素である．またフレームレートは 30fps であり，撮影された各フレーム画像を画像処理ソフト Photoshop で処理した．

使用したセンサーはクロスボー社製の傾斜センサ CXTA02 (表 2.1)である．ロボットの精度測定に使用した測定装置はレニショー社製の DBB（Double Ball Bar）システム QC-10 である．



(a) Definition of Joint (Ji)



(b) Definition of coordinate

Fig.2.1 Dual-arm robot

2.2.2　双腕ロボットの運動精度

なめらかな運動には，位置決め精度ではなく輪郭運動の精度が要求される．そこで，輪郭運動の精度測定に使用した測定装置はレニショー社製の DBB（Double Ball Bar）システム QC-10 である．本システムを用いた計測法を以後 DBB 法[(7)(8)(9)(15)]と称する．本計測結果を診断することで，NC の運動精度やサーボ系のゲイン調整が可能であることが知られている．測定原理は，円弧補間運動が可能な NC 機械（本論では双腕ロボットである）において，Σ_R は空間に固定された座標系とすると，ある点 O（0,0,0）を中心とする半径 R の円弧を描くような点 Q'（X_R'，Y_R'，Z_R'）の移動指令を与える．しかし NC の指令値と機械の実際の位置は運動誤差により一致しない[(7)]．そこで実際には移動点が点 Q(X_R, Y_R, Z_R)にあったとすると

$$R^2 = X_R'^2 + Y_R'^2 + Z_R'^2 \tag{2-1}$$

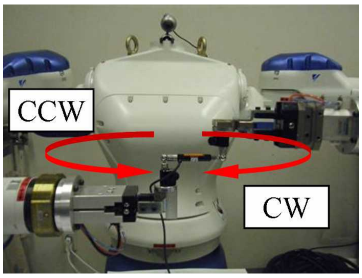
となる関係がある．

ここで，誤差ベクトルを原点 0 で$\vec{C}_0(0,0,0)$，点 Q で$\vec{C}(C_x, C_y, C_z)$とすると，中心 O(0, 0, 0)と点 Q(X_R, Y_R, Z_R)の間の距離は R とはならず，原点 O と Q'の間の距離を測定するバーは伸縮する．その伸縮量を ΔR として，誤差の二乗項を無視すると

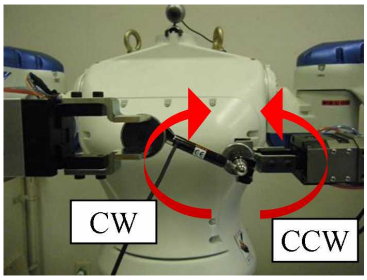
$$\Delta R = -\frac{1}{R}(X_R' C_x + Y_R' C_y + Z_R' C_Z) \tag{2-2}$$

となる．式（2-2）の原理により，DBB 法で各平面，半径 100mm で円運動した時の運動誤差を測定した．図 2.2 は測定の様子である．図 2.2（d）では，双腕で長さ 200mm の木製バーを保持して協調運動し，そのバーの中心に DBB の一端を取り付けた．

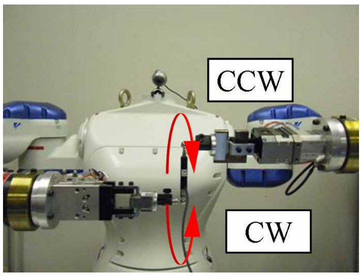
このロボットの低速最小直線運動のカタログ精度は 0.1mm．高速運動する時のエンドエフェクターの誤差は±1mm とされている．図 2.3，2.4，2.5 は DBB 法で X_R-Y_R，Y_R-Z_R，X_R-Z_R 平面，送り速度 1000mm/min で円運動した時の運動誤差の測定結果（座標系はプレートの中心位置を原点として図 2.1 (b)参照）を示す．片腕の場合の Y_R-Z_R，X_R-Z_R 平面では，回転方向は固定腕側から見た運動方向である．双腕の場合は右手から見た回転方向である．また X_R-Y_R 平面は頭部から見た回転方向である．図 2.3，2.4 より，片腕により各平面で運動をさせた場合の運動精度は非対称に 0.2～0.6mm であることがわかった．片腕の Y_R-Z_R，X_R-Z_R 平面の運動では, 肩部 (J1, J8) の運動反転に起因すると考えられる比較的大きな不連続な誤差が見えられる．X_R-Y_R 平面の運動では，J2，J9 の運動反転に起因すると考えられる誤差が見られる．非対称で不連続な運動誤差を生じることが，片腕運動の特徴であることもわかる．図 2.5 より双腕協調する場合，両腕の運動干渉を有するため，精度の絶対値は片腕よりすこし悪化するが，運動の不連続性非対称性が低減し，多関節型の産業用ロボットとしてはなめらかで十分な運動精度を示していることがわかった．



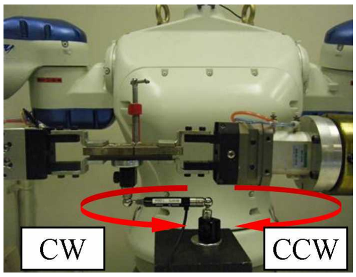
(a) X_R-Y_R



(b) Y_R-Z_R



(c) X_R-Z_R



(d) dual-arm

Fig. 2.2 Set up for DBB evaluation (right arm fixed)

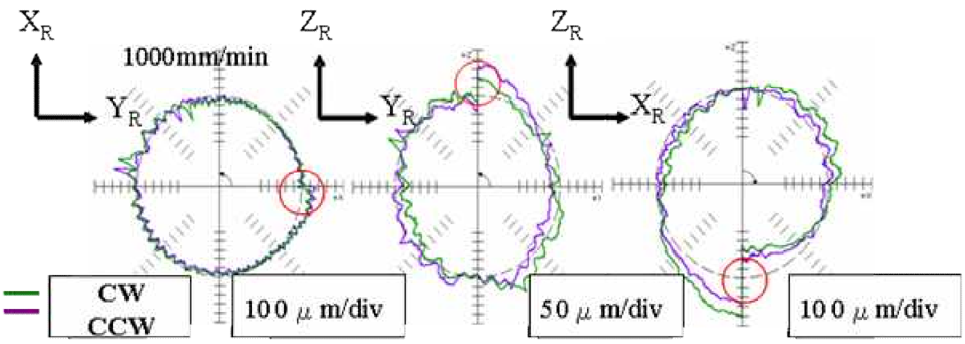


Fig. 2.3 Motion accuracy of robot (left arm fixed)

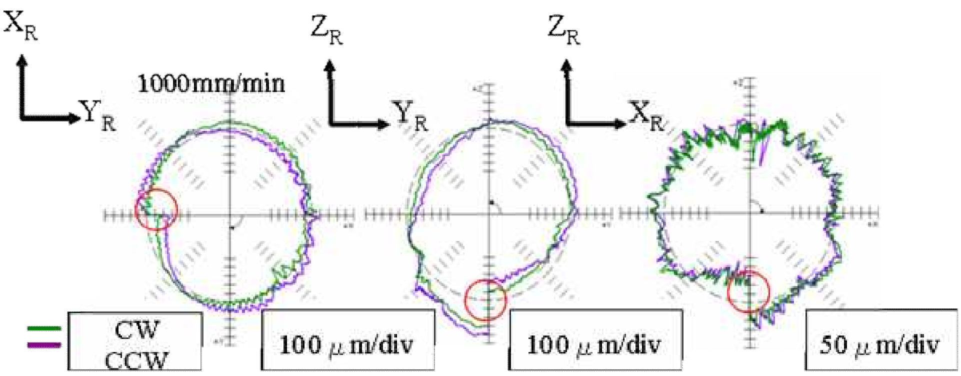


Fig. 2.4 Motion accuracy of robot (right arm fixed)

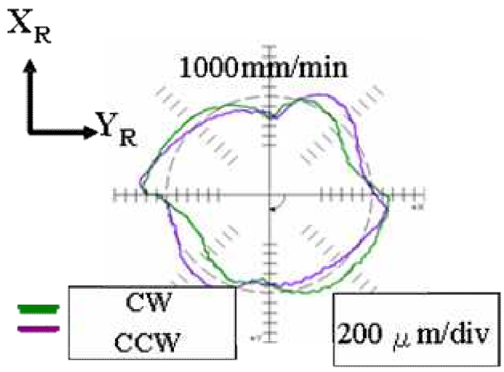


Fig. 2.5 Motion accuracy of robot (dual-arm)

2.2.3　作業プレートの支持方法と静剛性

人が作業プレートを操作する姿勢を参考にして，木製プレート（600×450×20mm）を支持したロボットの様子と座標系を図 2.1 (b)に示す.

プレート上のある点の Z_m 方向の荷重を P_i，変位を U_j とすると任意の荷重点 i と変位点 j における剛性 K_{ij} は

$$K_{ij} = \frac{P_i}{U_j} \tag{2-3}$$

となる.

そこで，変位ベクトル $\vec{U} = (U_3, U_4, U_5, U_6)$，力ベクトル $\vec{P} = (P_3, P_4, P_5, P_6)$ とすると，双腕支持されたプレートの変位は以下の式を満足する.

$$\begin{bmatrix} U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{33} & K_{43} & K_{53} & K_{63} \\ K_{34} & K_{44} & K_{54} & K_{64} \\ K_{35} & K_{45} & K_{55} & K_{65} \\ K_{36} & K_{46} & K_{56} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} \tag{2-4}$$

ここで，図 2.1 (b) に示す右腕のプレート支持点は点 1 (0, -300)，プレート座標の絶対原点は点 3 (0,0)，点 2 (225, -300)，点 4 (225, 0)，点 5 (0,300)，点 6 (225,300) である．i，j＝3 は (0, 0)，i，j＝4 は (225, 0)，i，j＝5 は (0, 300)，i，j＝6 は (225, 300) の位置を示す．次に，同様にして片腕 (左腕だけ支持)の場合は

$$
\begin{aligned}
&\vec{U}_i \quad (i = 1 \sim 6) \\
&\vec{P_j} \quad (j = 1 \sim 6) \\
&\vec{U}_i = K_{ij}\,\vec{P}_j \quad (i = 1 \sim 6, j = 1 \sim 6)
\end{aligned}
\tag{2-5}
$$

となる．

ここで i，j＝1 は（0,-300），i，j＝2 は (225,-300) である．実際に荷重を加えて K_{ij} を測定した式 (2-4)および式（2-5）における双腕支持と片腕支持の剛性の代表値として K_{ij} の値 (i=j の場合)を図 2.6 に示す．図 2.6 より，片腕支持では Y_m=-300 の位置で 0.002 N/μm 以下の値を示していることがわかる．一方，両腕支持では Y_m=0 の位置の 0.02N/μm を超える値で 10 倍以上の高い剛性を有していることがわかる．一般的な単純な片持ちはりと両端支持はり，両端固定はりを考えると，両者の剛性は 16 倍，64 倍になる．したがって，両端支持に近い剛性の向上である．また片腕でプレートの中心を支持した場合を想定して考えると，図 2.6 の片腕支持の中央値程度が予想される．図 2.6 よりその値は 0.006N/μm 程度を示しており，この場合においても 2 倍以上の剛性が維持できている．以上より，双腕支持にすることで，比較的剛性が低い木製プレートでも十分に剛性の高い作業空間が実現できたことがわかった．

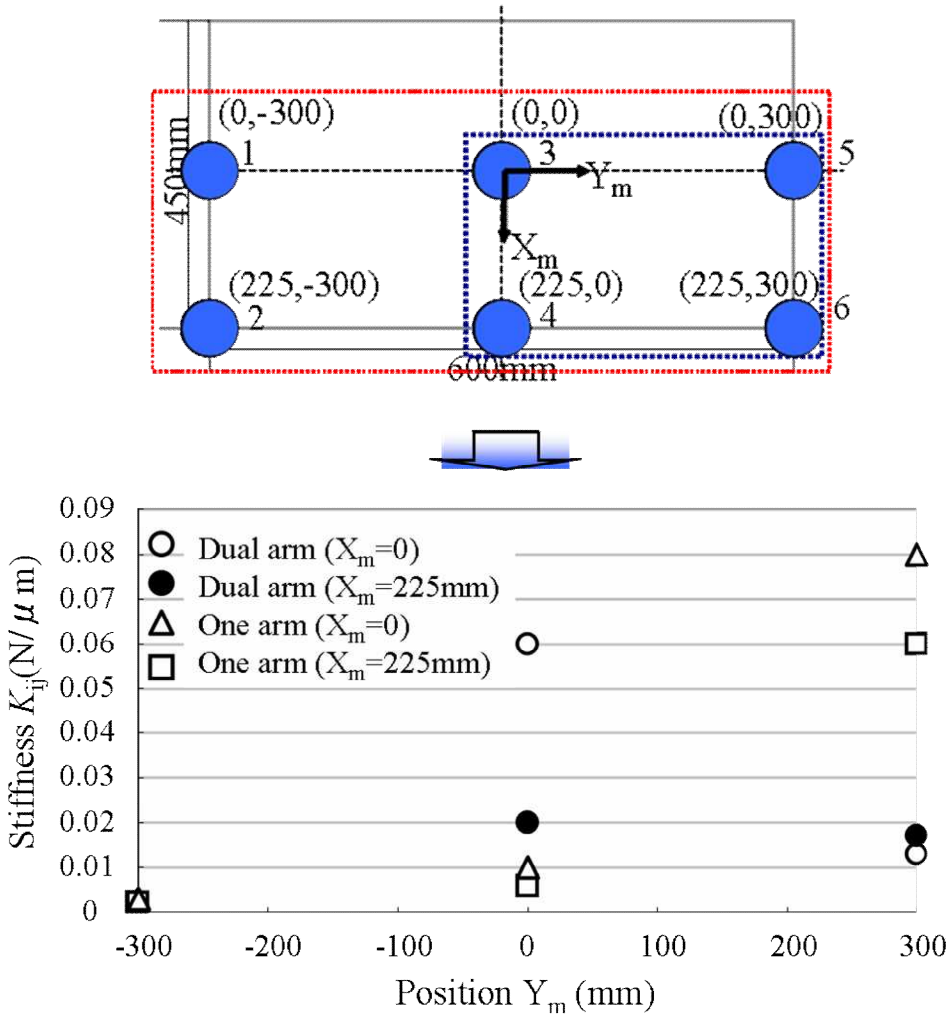


Fig. 2.6 Stiffness of a working plate

2. 3　提案手法と基本理論

2. 3. 1　基本モデルと提案する手法

2.1 章で述べた様に，近年の FA 技術において旋回中心を自由に設定できるテーブルの旋回運動のニーズが高い．またその運動には人の様ななめらかな運動を具現化したい．そこで不安定な物体のなめらかな運動制御の例として，テーブル上でなめらかに球を転がり円運動させる場合を最初のステップとして考え

る．まず，図 2.7 のように斜面 (例えば，X_m 方向，傾斜角 θ_y) のボールの転がり運動のモデルを考える．斜面に沿って下向きに X_m (Y_m) 軸，これと垂直に Z_m 軸をとる．θ_y はプレート Y_m 軸まわりの水平に対する回転角であり，プレート回転と DBB 実験の座標系は右手系にしたがって CCW 方向を正とする．プレートにガイドがなく理論上は 6 自由度で自由に運動可能である．このような運動体[25]には次のような運動座標系[26]を導入すると便利である．すなわち，Σ_m はプレートに固定された座標系，Σ_B は対象物の重心位置に固定された座標系（Z_m 軸はプレートとの接触面に直交する）である．ここでは，球体を扱うため飛行機のように三次元空間での姿勢は無視でき，重心の位置のみ分かれば良いため，便宜上 Σ_B の Σ_m から見た回転は無視し，平行移動するだけとする．また，Σ_m から見た Σ_B 位置(ボールの重心)を ${}^mX_B, {}^mY_B$ と表記する．$\theta_0=\theta_{x0}=\theta_{y0}$ はプレート傾きの最大角度である．ここで，ボールの半径は r，回転角 φ，ボールの質量を M とすると，ボールの重心の運動方程式[27][28]は

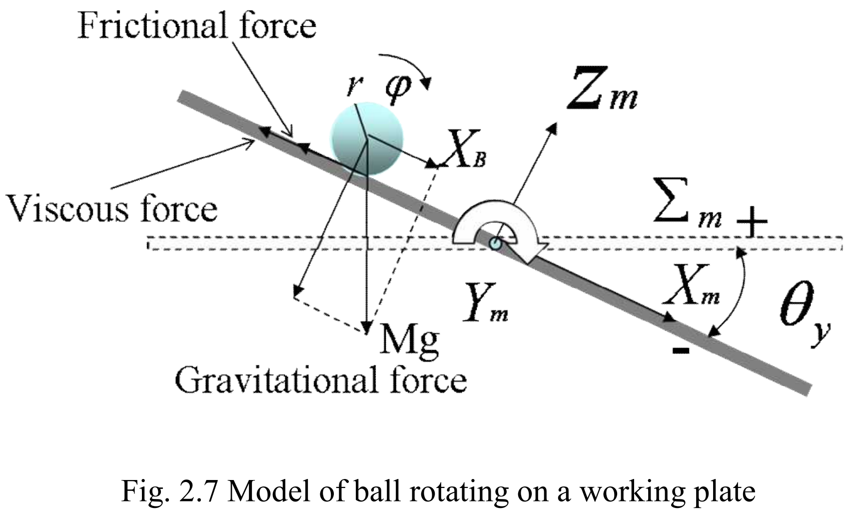


Fig. 2.7 Model of ball rotating on a working plate

$$M \frac{d^2\,{}^mX_B}{dt^2} = Mg\sin\theta_y - f - D\frac{d\,{}^mX_B}{dt} \tag{2-6}$$

となる．ここで式の右辺は，重力，ボールとプレートの接触点における摩擦力 f=f_x=f_y，速度に比例する減衰項 D である．またボールの重心のまわりの回転運動に対する式は

$$I\frac{d^2\varphi}{dt^2} = rf \tag{2-7}$$

ここで，球心まわりの慣性モーメントを I とし，式(2-7)を変形して

$$f = \frac{I}{r}\frac{d^2\varphi}{dt^2} \tag{2-8}$$

式(2-6)と(2-8)により

$$M\frac{d^{2m}X_B}{dt^2} = Mg\sin\theta_y - \frac{I}{r}\frac{d^2\varphi}{dt^2} - D\frac{d^mX_B}{dt} \tag{2-9}$$

が得られる．ここで，ボールがプレート上をすべらないとすると，次式が得られる．

$$\frac{d^mX_B}{dt} = r\frac{d\varphi}{dt} \tag{2-10}$$

ここで式(2-10)を時間 t で微分すると

$$\frac{d^{2\,m}X_B}{dt^2} = r\frac{d^2\varphi}{dt^2} \tag{2-11}$$

となる．密度一様な球体の慣性モーメント I＝(2/5)Mr^2 であるので(2-11)式を(2-9)式に代入して整理すると，プレートの操りによる斜面を転がるボールの運動方程式は

$$M\frac{d^{2\,m}X_B}{dt^2} = \frac{5}{7}(Mg\sin\theta_y - D\frac{d^{m}X_B}{dt}) \tag{2-12}$$

$$\frac{d^{2\,m}X_B}{dt^2} = \frac{5}{7}g\sin\theta_y - D_M\frac{d^{m}X_B}{dt} \tag{2-13}$$

と表される．ここで，D_{M}＝5D/7M である．

プレートの角度 θ は時間 t の関数であり，ω は角速度（＝2πf_f ＝2π/T，ここで f_f は運動の周波数 Hz，T は運動の周期 s) で，θ_0 は最大傾斜角である．ここで，$\mathrm{X_m}$-$\mathrm{Y_m}$ 平面における転がり円運動は，$\mathrm{X_m}$-$\mathrm{Z_m}$ 平面または $\mathrm{Y_m}$-$\mathrm{Z_m}$ 平面から見ると，それぞれに転がりの単振動すると考えられる．そこで θ (θ_{x0}, θ_{y0})が十分に小さな場合を考え，実際にロボットでプレートを操作する時は $\mathrm{Y_m}$ 軸まわりに対して $\mathrm{X_m}$ 軸まわりは回転角 $\theta_{\mathrm{x}}(t)$の位相 α 遅れを 90 度として，ボールの $\mathrm{X_m}$-$\mathrm{Y_m}$ 平面における運動方程式は

$$\begin{bmatrix} \dfrac{d^{2m}X_B}{dt^2} \\ \dfrac{d^{2m}Y_B}{dt^2} \end{bmatrix} = \frac{5}{7} g \begin{bmatrix} \theta_y \\ \theta_x \end{bmatrix} - D_M \begin{bmatrix} \dfrac{d^m X_B}{dt} \\ \dfrac{d^m Y_B}{dt} \end{bmatrix} \tag{2-14}$$

$$\theta_y(t) = \theta_{y0} \sin(\omega t) \tag{2-15}$$

$$\theta_x(t) = \theta_{x0} \sin[\omega t + \alpha] = \varepsilon \theta_{y0} \sin[\omega t + \alpha], (0 < \varepsilon) \tag{2-16}$$

と示される．ここで α＝90°，θ_y＝θ_x（すなわち，両軸の最大角度の比 $\theta_x/\theta_y=\varepsilon=1$）として，この運動を同時 14 軸で同期制御してプレート上にボールの円軌道を生じさせる．実際の実験で使用するプレートは 2.2.3 節と同様に木製で 600×450×20mm とし，摩擦係数を一定にするために厚さ 5mm のアクリル板をそのプレート上に配置した．その平面度は±0.003mm である．

2.3.2 減衰項の算出

ボールの転がり運動中には減衰項が無視できないと考えられるので，減衰係数 D を実測する．プレートと同じ材料のアクリルパイプ（内径 Φ＝128mm）とマウスボール（直径 22mm，質量 31g，鋼球に薄いゴム皮膜付き）を使った転がり振り子とした．円筒面からの初期高さ h_1＝$\Phi/2$ ＝64mm で手を放して，振り子運動中の底面からの各最大高さを測定した．その値より円筒面上の円弧長さに換算した各片振幅 b_n を式 (2-17)，式 (2-18) に代入して

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{b_1 + b_2}{b_{n-1} + b_n} \tag{2-17}$$

$$\xi = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{D}{2\sqrt{mk_k}} \tag{2-18}$$

(ボールの半径 r, δ は対数減衰率, ζ は減衰比, k_k ＝$5Mg/7\{(\Phi/2)-r\}$, b_n は振幅, D は減衰係数である)計算した減衰係数 D は 0.053 であった．ここで，この転がり振り子の理論周期は 0.546 s であり，実験で測定された周期は 0.53 s で，両者はほぼ一致している．したがって，振動運動中はすべることなく転がり運動をしていたものと考えられる．

2. 3. 3　転がり運動とテーブル傾斜角度の設定

ストライベック曲線などでも示されているように，ごく低速の物体の運動などは摩擦力が一定にならない．また一方，斜面が急な場合は転がり運動に加えてすべり運動も発生する可能性がある．そこで安定した転がり運動を実現する傾斜角の範囲を調べる．すなわち，テーブルの傾斜角 θ が一定の場合には，初期速度をゼロとした時，ボールの移動距離 L，重心の斜面方向の加速度 a_a，時間 t は式 (2-19)，式 (2-20) の関係となる．

$$a_a = \frac{5}{7} g \sin\theta \tag{2-19}$$

$$t = \sqrt{\frac{2L}{a_a}} \tag{2-20}$$

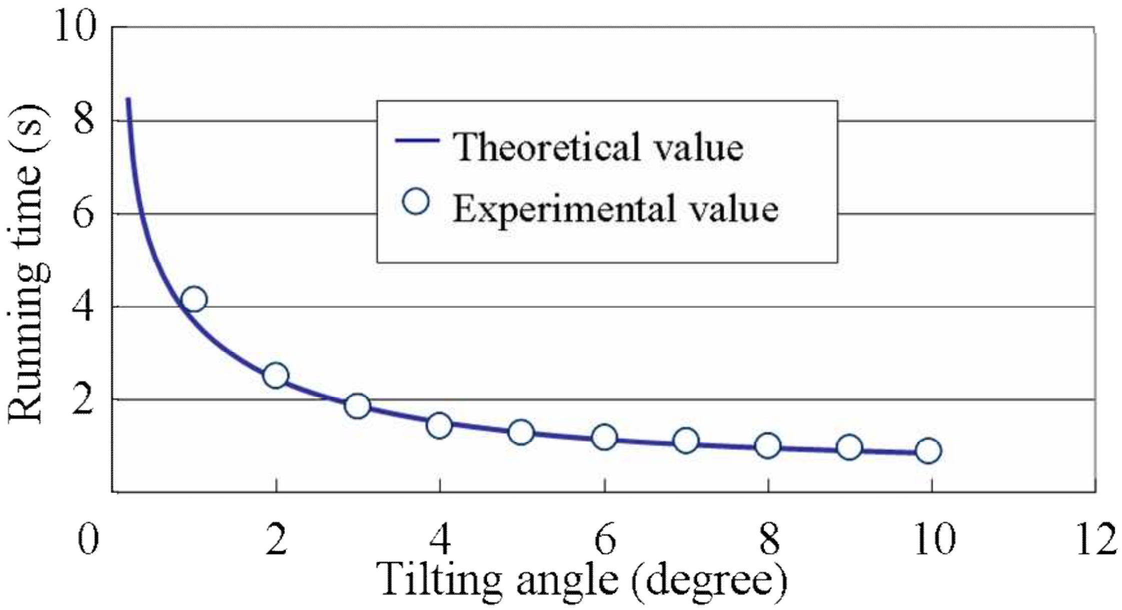


Fig. 2.8 Influence of tilting angle on running time

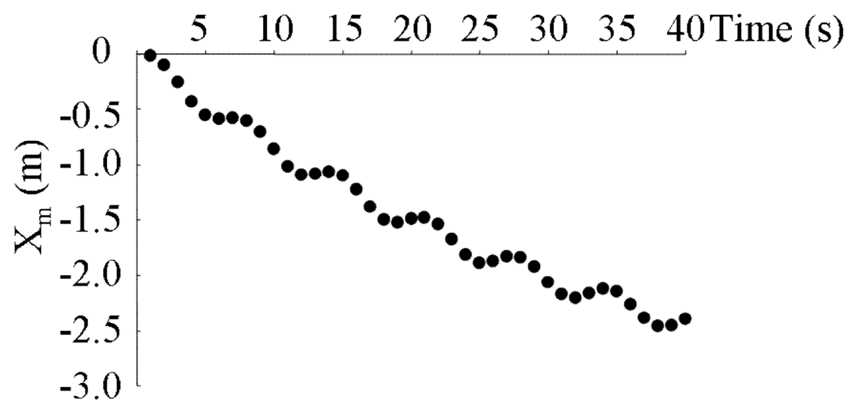
図 2.1(b)のテーブル Y_m 軸方向 (L＝0.6m，傾斜角は一定) に実際にボールを転がし，式 (2-20)よる理論値と転がりに要した実時間を比較した結果を図 2.8 に示す．図 2.8 より，傾斜角が小さい場合はボールが蛇行運動するなどして，両者は一致いないことがわかる．しかしながら，傾斜角 2 度以上 10 度以下では安定した転がり運動により両者は一致した．そこで本研究では，本結果を目安にして式(2-15)，(2-16)のテーブルの最小傾斜角 $\theta_y = \theta_x$ は 2°～10° を用いることにした．また，本実験の範囲ではすべりが起こらず，その最大傾斜角についても 10° 以下であればすべりの影響を考慮しなくて良いと考えられる．

2. 4　結果および考察

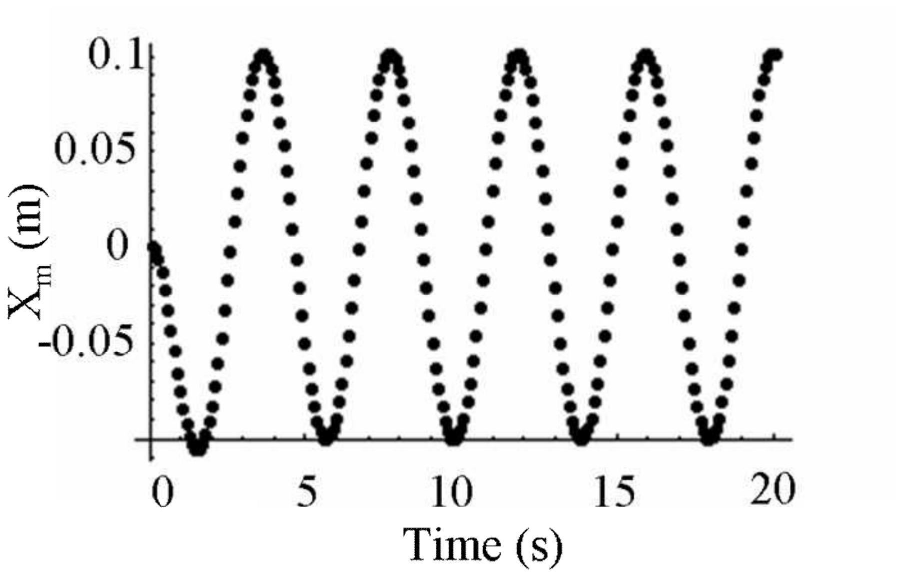
2. 4. 1　単振動モデルのシミュレーション

式 (2-13) において，$D_M = 0$，$\theta_y = \theta_{y0}\sin\omega t$ とした場合の X_m 方向のボールの転

がり運動を考える．例えば，θ_{y0}＝3°，周期 T＝4.0s，すなわち ω＝2π/4.0＝0.5rad/s として計算すると，特殊解を除いて時間に比例して振動の中心が X_m 方向に移動する不安定な様子{図 2.9(a)}が見られた．そこで特殊解に注目して振動の片振幅を求めると 0.16 (m)となった．しかしながら，減衰項 D_M の値を次第に大きくして数値解を求めると，振幅が減少して中心のずれは少し生じるが定常の単振動{図 2.9(b)} の運動を実現できることもわかった．



(a) Unstable motion



(b) Stable motion

Fig. 2.9 Influence of damping on single harmonic motion

2. 4. 2　転がり円運動モデルのシミュレーション

2.4.1 節より減衰項が大切な役割になることがわかった．特に減衰項の値が小さい時，ボールの原点からの軌跡は不安定現象を生じることがわかった．X_m 軸まわりおよび Y_m 軸まわりのどちらかに振動運動の中心移動が残っているとボールの運動は円の軌跡に収束しない．そこで，2.3.2 節の実験で測定した減衰項の値を式 (2-14) に代入して計算した．結果が図 2.10 である．本条件を用いるとプレート上に転がり円軌道（半径 R_c＝0.1m）を生成できることがわかった．また，方程式に遠心力の項(後章に述べる)を考慮してないため，初期値からのボールの転がり過度応答は表せなく，定常状態の軌道しか表せないこともわかった.

次に, D_M を変化させた場合の転がり円軌道の半径を計算した. 結果を図 2.11 に示す. 図より R_c＝0.1m 付近では，D_M の値がわずかに変化しても，円軌道の半径に大きな影響があることがわかる.

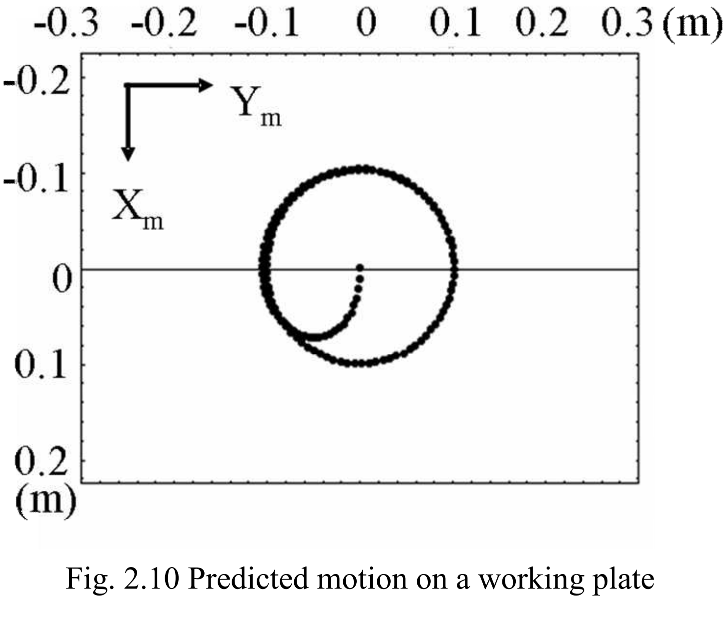


Fig. 2.10 Predicted motion on a working plate

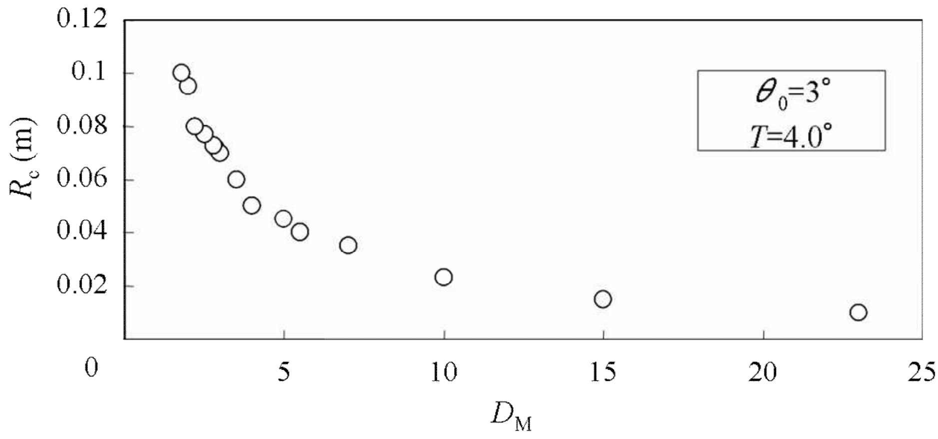


Fig. 2.11 Change of radius by damping

2. 4. 3 双腕ロボットによる操り結果

2.4.2 節の結果を基本にして，図 2.1(a)中の J1～J14 までの同時 14 軸制御を実行して，双腕の協調で図 2.1(b)に示す X_m 軸まわりおよび Y_m 軸まわりの同期運動をプレートに与えた. 指令値は 1 周期を 4 点で近似して三角波として与えた. ボールの転がりの実軌跡とシミュレーション結果の比較 (傾斜角 θ_0＝3°, 周期 T＝3.3s，半径 R_c＝0.1m の例) を図 2.12 に示す．実軌跡はプレート上を転がるボールをモニターカメラで撮影してデータを取得した．図 2.12 より，Y_m 軸まわりの誤差は大きく，X_m 軸まわりも完全に対称な軌跡とならないことがわかる．また半径方向の転がり誤差 (＝実半径－R_c) は最大 10mm 程度であることもわかる．そこでプレートの原点に傾斜センサーを取り付け，運動中の実テーブル角度を計測した．半径 R_c＝0.1m 一定とした場合の結果を図 2.13(傾斜角 θ_0＝2°，周期 T＝5.5s，半径 R_c＝0.1m，傾斜角 θ_0＝3°，周期 T＝4.0s，半径 R_c＝0.1m, 傾斜角 θ_0＝4°，周期 T＝3.4s，半径 R_c＝0.1m の例)に示す．ほぼ正弦波に近似した波形を得られた．また，結果より，プレートの Y_m 軸まわりは，主に図 2.1(a)の J7，J14（手首）の運動であるが，X_m 軸まわりの回転運動の反転動作時(主に J1，J8 軸の肩運動) に振動が加わるなどとしている．すなわち，Y_m 軸まわりは回転方

向の動剛性が低く, 動的な運動制御の精度が低下していることがわかる. 一方, X_m 軸まわりも反転運動後に不安定な振動が見られ，角度の最大と最小の絶対値に若干の差が見られる．これらの影響により、転がり運動に半径差 10mm 程度の誤差が生じたものと考えられる．また図 2.13(a)～(c)を比較すると，プレートの操作角度を増大するほど位置決め精度が悪くなることもわかる．しかしながら，10mm 程度の転がり誤差を有しているが安定した転がり運動を具現化しており，プレートをエンドエフェクターと考えた場合，十分な作業動作を実現できたと考えられる．

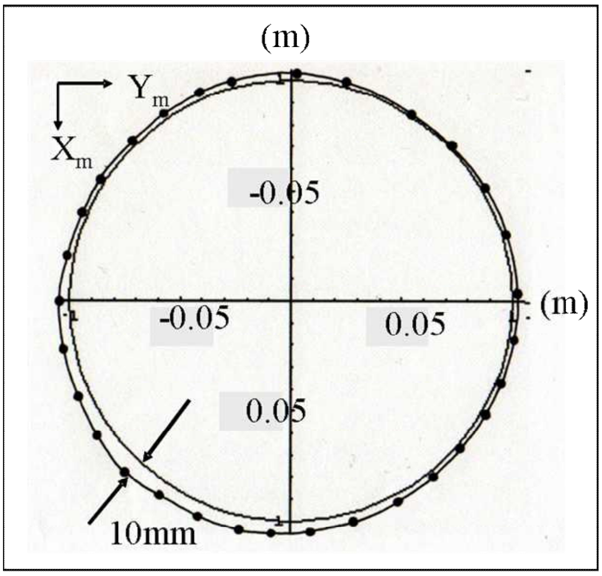
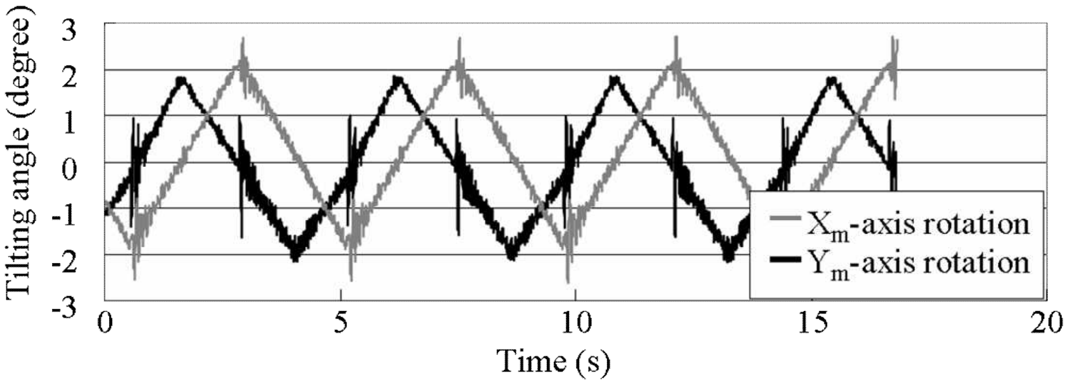


Fig. 2.12 Motion error of rotating ball on a working plate

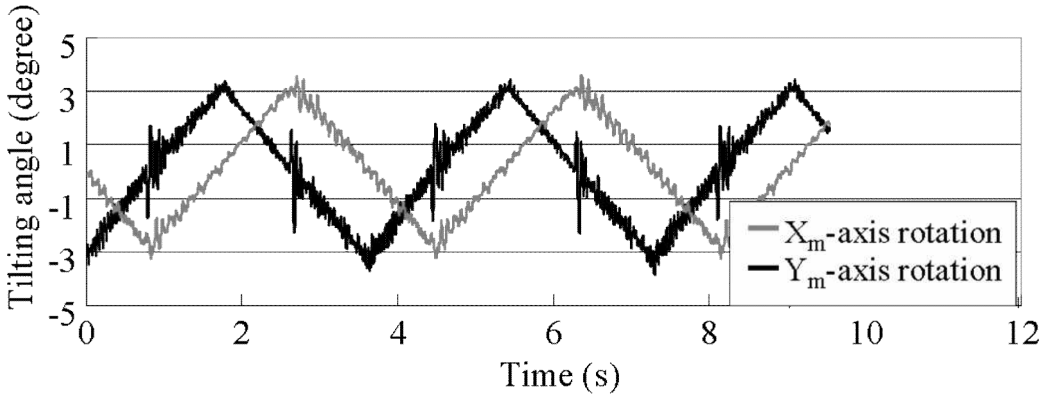
2. 4. 4　転がり半径誤差を生じる原因

実験結果の転がり運動の半径誤差が常にプラス値 (図 2.12 参照) になることがわかった．基準円の周期で均一に半径方向にプラス 10mm の誤差が生じるな

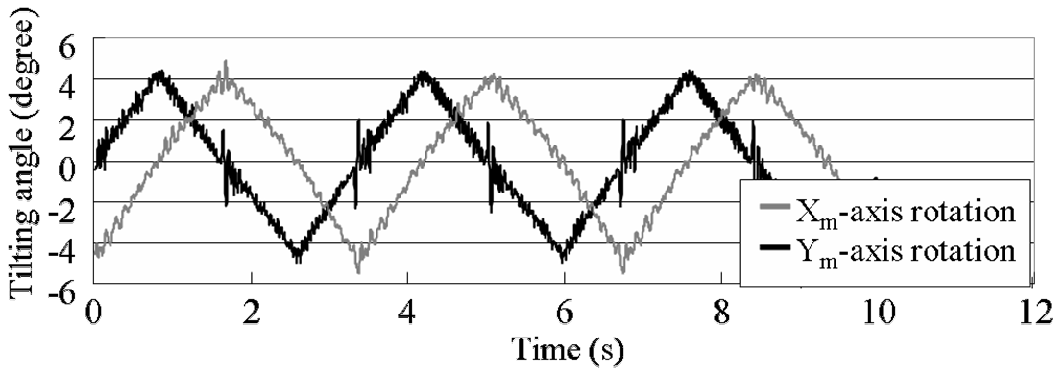
ら減衰係数の測定誤差の可能性が高い．しかしながら図 2.13 より，軌跡が真円から変形する誤差が存在していることがわかり，テーブル旋回角の制御上の誤差も影響しているものと考えられる．そこで，最大操作角度，運動周期を変化させた場合について，実円軌跡の半径誤差を調べた．実軌跡を楕円と近似して，最大誤差 Δr_1, 長軸と短軸の差 Δr_2 を調べた結果を図 2.14, 図 2.15 に示す. 図 2.14 は，半径を一定として，操作角度を変化 (周期 T＝4.7s～3.3s) させた場合で，図 2.15 は最大操作角度(式 (2.15)，式 (2.16) で $\theta_y = \theta_x = 3°$) を一定して，周期を変化 (半径 R_c＝0.034～0.19m)させた場合である．図 2.14 より，転がり円の半径を一定にした場合，最大操作角が小さい方が半径誤差が大きいことがわかる．これは制御角度の誤差が一定のためと考えられる．図 2.15 より，最大操作角度一定の場合は周期が短い方が誤差率が大きいことがわかる．この理由は，X_m，Y_m 軸の同期誤差 (式 (2.16) 中の位相α ＝90°からの差) と考えられる．図 2.13 (a), (b), (c) において，X_m 軸まわりで反転運動の直後に振動が発生して当該軸の極大および極小値を示す時刻に遅れが見られ，Y_m 軸に対する同期精度に影響しているものと考えられる．すなわち，図 2.2 の Y_R-Z_R 平面における反転運動の大きな誤差に起因する現象と考えられる．図 2.16 は，位相角として 3° の同期誤差 (α ＝－93°とした場合) を与えた場合の数値解の例である．本結果は， X_m 軸と Y_m 軸運動の一種のサーボのミスマッチによる位相α の誤差により，楕円と近似した場合に，長軸および短軸が，X_m 軸 Y_m 軸と一致しない事も示された．この理由は，X_m と Y_m 軸の回転位相は 90 度ずれているため，X_m (Y_m) 軸が振動する途中 Y_m (X_m) の振動が入力されお互いに影響されると考えられる．



(a) θ_0=2 °



(b) θ_0=3 °



(c) θ_0=4 °

Fig. 2.13 Tilting angle of working plate

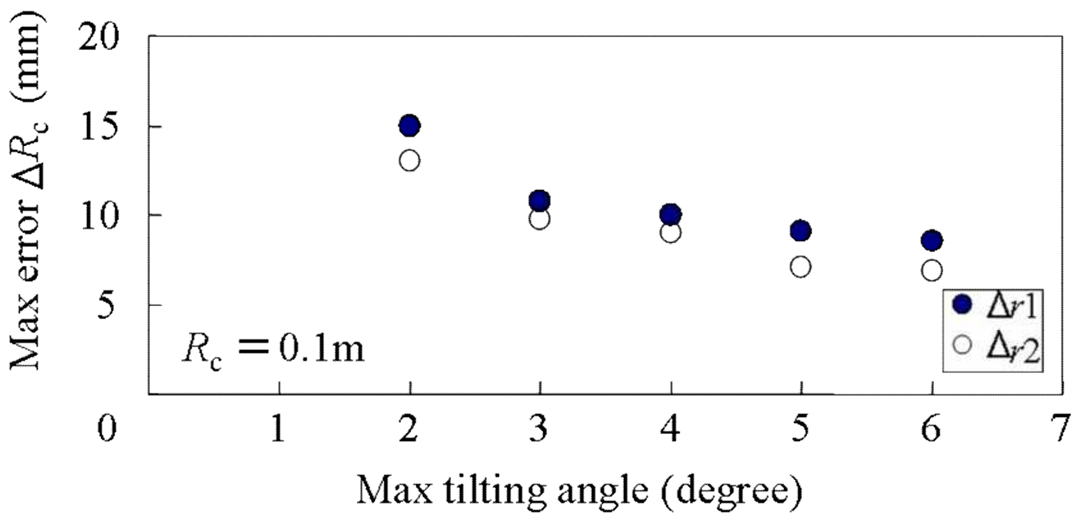


Fig. 2.14 Influence of maximum tilting angle on radius error ΔR_c

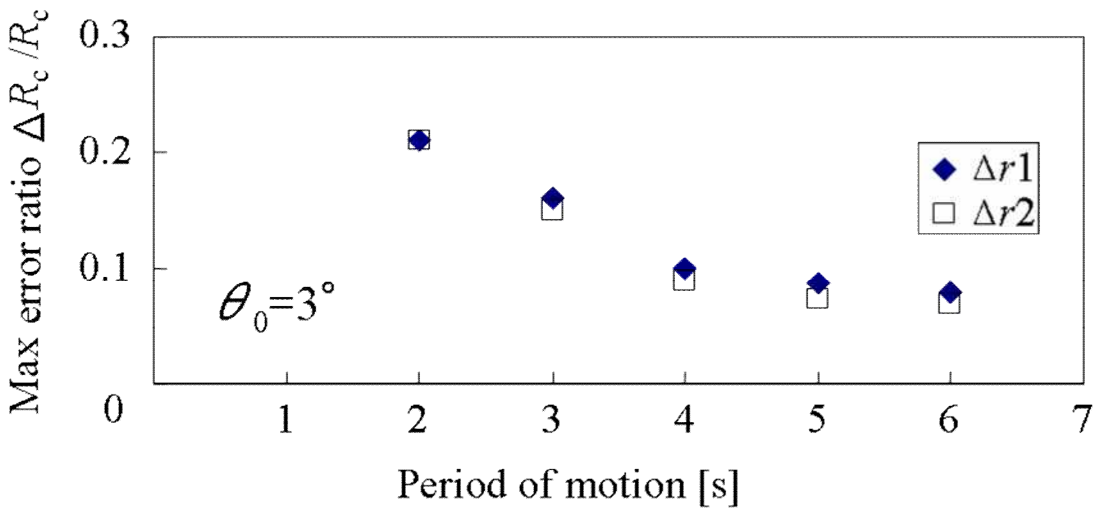


Fig. 2.15 Influence of period on radius error ΔR_c

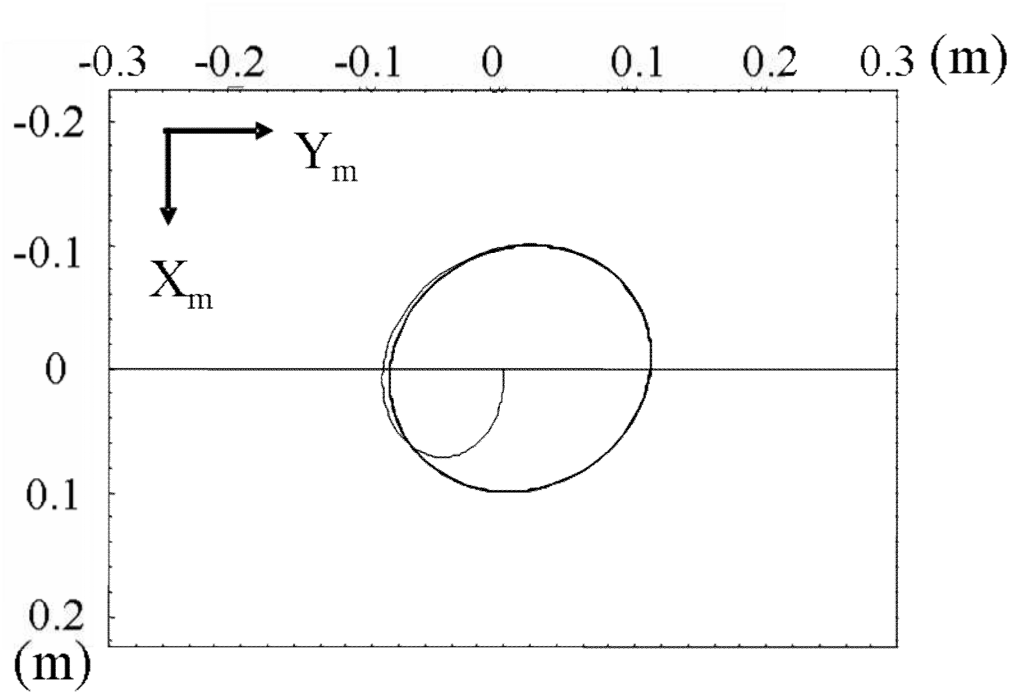


Fig. 2.16 Predicted motion with synchronous error
(T=4.05s, Maximum angle=3deg, R_c =0.1m)

2. 5　結　　言

FA (Factory Automation) における双腕ロボットの新しい応用を目指した最初のステップとして，双腕で作業プレートを支持してエンドエフェクターとして操る手法を検討した．特に同時 14 軸制御により作業プレート上にボールを転がり運動させる動作に取り組み，以下の結果を得た．

(1)　双腕で支持することで，木製の様な剛性が比較的低い作業プレートを用いても，エンドエフェクターとして十分な作業空間が具現化できる．

(2)　平面の作業プレート上にボールを定常的転がり円運動させるような作業

において十分な精度が確保されていることが判明し，本手法は十分に実用域にあることがわかった．しかしながら，肩部などの特定の 1 軸の反転運動後に生じる振動により運動に同期誤差が生じるため，操作角度だけではなく，当該現象も考慮して改善を進める必要があることもわかった．

(3)　直交する回転 2 軸の運動制御において，転がりボールの運動を制御する事で，その運動精度を判定することが可能である．すなわち，X_m 軸また Y_m 軸に沿って楕円運動を生じる時は X_m 軸と Y_m 軸の最大傾斜角の不一致が生じている．また，楕円の軸が X_m 軸また Y_m 軸と一致していない時は，運動の位相角 α に誤差を生じ，サーボの不一致が生じていることがわかった．

(4)　双腕の閉リンク的な協調制御を積極的に利用する手法は，次世代の自動化技術として有望であることが示された．

第 3 章　ボールの転がり軌跡によるプレートの 2 軸旋回運動制御の誤差検出方法

3. 1　緒　　　言

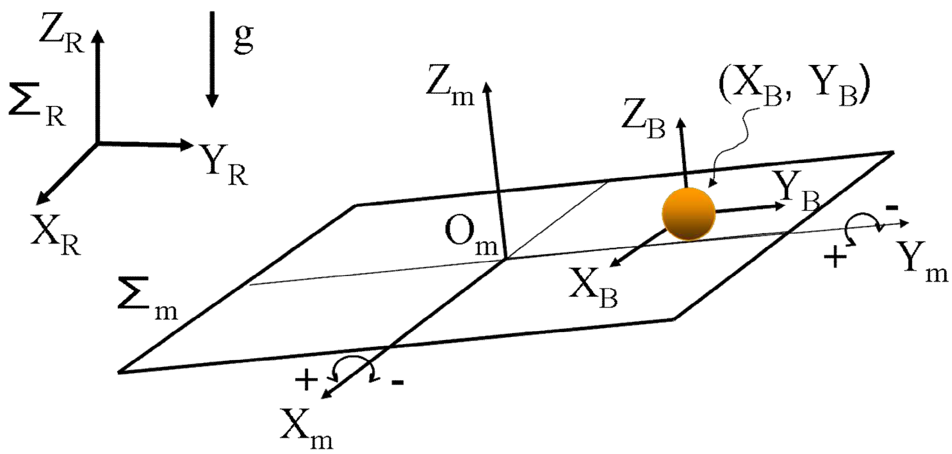
前章では，双腕ロボットで作業プレートを支持することで閉リンク機構を構成してエンドエフェクターとして活用する手法を提案し，作業プレートを操ることで作業空間として十分な可能性がある(30)ことを示した．特にテーブル旋回運動が 2 軸以上の場合に柔軟性が高い運動を実現できることがわかった．それらの研究の中で，作業プレートを同時 2 軸制御で旋回運動させる場合についての運動精度の評価が必要となってきた．直進軸の同時 2 軸制御における運動精度の評価には DBB 法(7)~(9)など多くの研究報告がなされているが，旋回軸の同時 2 軸制御に関する報告例は少ないようである．作業プレートの旋回 2 軸の同期制御特性を計測するには，例えば高精度のジャイロセンサーなどを用いる手法が考えられるが，当該センサーが高価であり現場的ではなかった．そこで本章(35)では，基本となる運動方程式に遠心力の項も加えて過度運動にも適用できる様に理論を拡張する一方で，双腕ロボットに作業プレートを支持して双腕の協調制御による同時 2 軸制御の旋回運動を与え，プレート上で球の転がり運動軌跡を解析することで，その運動精度の評価について考察した．その結果，同時 2 軸制御の旋回運動における簡易な評価手法として有効であることが判明した．

3. 2　基本理論の拡張と状態方程式

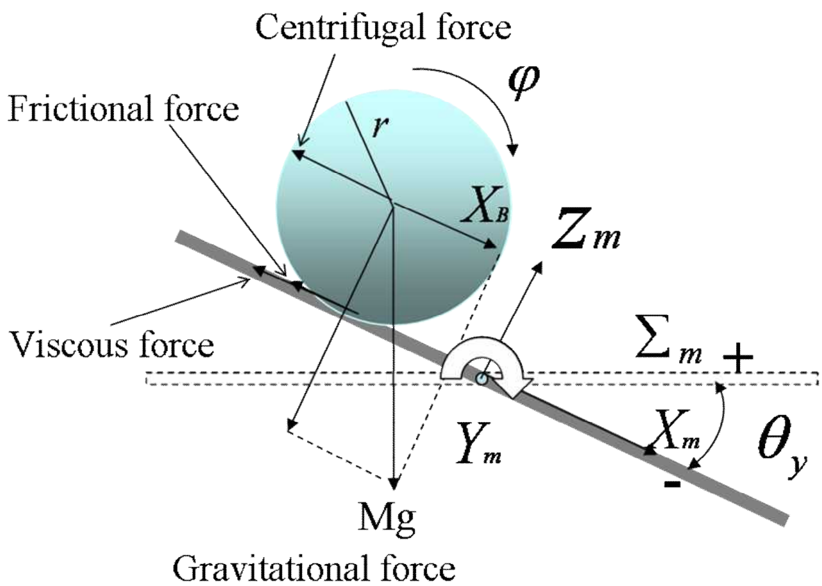
3. 2. 1　基本理論の拡張

CNC 工作機械の直進 2 軸の運動精度を診断する手法としては，機械の主軸に円運動指令を与え，その時の機械の実運動との半径差より運動誤差を評価する DBB 法がよく知られている．この場合，直交する直進 2 軸（例えば Y_R 軸と X_R 軸）の位置指令は，一方の軸に正弦関数 $R_c\sin\omega t$，他方の軸に余弦関数 $R_c\cos\omega t=R_c\sin(\omega t+90°)$ の指令を与えることにより，2 軸を含む平面内で半径 R_c の円運動をさせる．このときに，機械が実際に描く円弧の半径を DBB により計測し，指令半径 R_c との差より運動誤差を診断するものである．双腕ロボットにおいても，両腕でプレートを支え，プレート平面上の直交する 2 軸にそれぞれ正弦関数 $\theta_0\sin\omega t$ と余弦関数 $\theta_0\cos\omega t$ で角度指令（ここで θ_0 は最大傾斜角，$0<\theta_0<90°$）を与えると，プレート上に置かれたボール（球体）に円運動させることができる．そこで，プレート上で半径 R_c の円運動をするようにロボットに指令を与え，その時のプレート上でのボールの運動を画像解析等により計測すれば，DBB 法と同様の評価手法で双腕ロボットの 2 軸旋回運動誤差を診断できると考えられる．前章のモデルでは，運動の開始時からボールが定常的な転がり円運動に達するまでの過度応答を精度よく解析することができなかった．そこで，本章では，運動方程式において慣性力(遠心力)を追加して解析モデルの精度の向上を行う．本手法は，旋回運動において絶対基準として重力軸に着目し，2 軸旋回を 2 自由度の平面上の運動として表すものである．さらにすべりに比べて転がり運動の方が，動摩擦力が小さく高感度になる．そこでボールの転がり運動に着目した．まず，図 3.1(a)のような飛行機ダイナミクス座標系 [25] O_m-$X_mY_mZ_m$ を参考して，プレートの重心を座標の原点とした三次元モデルを考えて，図 3.1

(b)のように斜面（例えば，X_m 方向，傾斜角 θ_y）のボールの転がり運動のモデルを考える．また，前章よりボールの重心の運動方程式は



(a) Three dimensional coordinate



(b) Two dimensional coordinate

Fig.3.1 Model of ball rolling on working plate

$$M\frac{d^2\,{}^mX_B}{dt^2}=Mg\sin\theta_y-f-D\frac{d\,{}^mX_B}{dt}-M\,{}^mX_B(\frac{d\theta_y}{dt})^2 \tag{3-1}$$

となる. ここで式の右辺は, 重力, ボールとプレートの接触点における摩擦力 f , 速度に比例する粘性項 D, プレート回転中におけるボールの遠心力 $M\,{}^{m}X_{B}(d\theta_y/dt)^2$ である．またボールの重心のまわりの回転運動に対する式は

$$I\frac{d^2\varphi}{dt^2}=rf \tag{3-2}$$

ここで，球心まわりの慣性モーメントを I とし，式(3-2)を変形して

$$f=\frac{I}{r}\frac{d^2\varphi}{dt^2} \tag{3-3}$$

式(3-1)と(3-3)により

$$M\frac{d^2\,{}^mX_B}{dt^2}=Mg\sin\theta_y-\frac{I}{r}\frac{d^2\varphi}{dt^2}-D\frac{d\,{}^mX_B}{dt}-M\,{}^mX_B(\frac{d\theta_y}{dt})^2 \tag{3-4}$$

が得られる．ここで，ボールがプレート上をすべらないとすると，次式が得られる.

$$\frac{d\,{}^mX_B}{dt}=r\frac{d\varphi}{dt} \tag{3-5}$$

ここで式(3-5)を時間 t で微分すると

$$\frac{d^{2\,m}X_B}{dt^2} = r\frac{d^2\varphi}{dt^2} \tag{3-6}$$

となる．密度一様な球体の慣性モーメント I＝(2/5)Mr^2 であるので(3-6)式を(3-4)式に代入して整理すると，プレートの操りによる斜面を転がるボールの運動方程式は

$$M\frac{d^{2\,m}X_B}{dt^2} = \frac{5}{7}(Mg\sin\theta_y - D\frac{d^mX_B}{dt} - M\,{}^mX_B(\frac{d\theta_y}{dt})^2) \tag{3-7}$$

$$\frac{d^{2\,m}X_B}{dt^2} = \frac{5}{7}g\sin\theta_y - D_M\frac{d^mX_B}{dt} - \frac{5}{7}{}^mX_B(\frac{d\theta_y}{dt})^2 \tag{3-8}$$

と表される．ここで，D_M＝$5D/7M$ である．

プレートの角度 θ は時間 t の関数であり，ω は角速度（＝$2\pi f_f$ ＝$2\pi/T$，ここで f_f は運動の周波数 Hz，T は運動の周期 s）で, θ_0 は最大傾斜角である．ここで，θ が十分に小さな場合を考え，実際にロボットでプレートを操作する時は Y_m 軸まわりに対して X_m 軸まわりは回転角 $\theta_x(t)$の位相 α 遅れを 90 度として，ボールの X_m-Y_m 平面における運動方程式は

$$\begin{bmatrix}\dfrac{d^{2m}X_B}{dt^2}\\ \dfrac{d^{2m}Y_B}{dt^2}\end{bmatrix} = \frac{5}{7}g\begin{bmatrix}\theta_y\\ \theta_x\end{bmatrix} - D_M\begin{bmatrix}\dfrac{d^mX_B}{dt}\\ \dfrac{d^mY_B}{dt}\end{bmatrix} - \frac{5}{7}\begin{bmatrix}{}^mX_B(\dfrac{d\theta_y}{dt})^2\\ {}^mY_B(\dfrac{d\theta_x}{dt})^2\end{bmatrix} \tag{3-9}$$

$$\theta_y(t) = \theta_{y0}\sin(\omega t) \tag{3-10}$$

$$\theta_x(t) = \theta'_{x0}\sin[\omega t + \alpha] = \varepsilon\theta_{y0}\sin[\omega t + \alpha], (0 < \varepsilon) \tag{3-11}$$

と示される．ここで α＝90°，θ_y＝θ_x（すなわち，両軸の最大角度の比 $\theta_x/\theta_y=\varepsilon=1$）として，この運動を同時 14 軸で同期制御してプレート上にボールの円軌道を生じさせる．

3. 2. 2　慣性力を考慮したボールの運動制御の状態方程式

前節でボールについての X_m-Y_m 平面における運動方程式を考えた．ボールの運動を制御するために，制御系の状態方程式を考える．運動方程式(3-8), (3-9)よりボールの駆動力は作業プレートの傾斜により与えられている．ここで，ボールの駆動力を F_{Ball} とすると，F_{Ball} =5/7$Mg\theta_y$ が得られる．ボールは X_m,Y_m 軸上ではどちらも単振動する点は同じなので，ここは X_m 方向だけ考える．方程式(3-8)により変形して ${}^mV_B$ はボールの速度とし，ボールが X_m 方向の状態方程式は

$$\begin{bmatrix} \dfrac{d{}^mV_B}{dt} \\ \dfrac{d{}^mX_B}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_M & -\dfrac{5}{7}(\dfrac{d\theta_y}{dt})^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^mV_B \\ {}^mX_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/M \\ 0 \end{bmatrix} F_{Ball} \tag{3-12}$$

がある．両辺をラプラス変換して

$$\begin{aligned} s{}^mV_B(s) + {}^mV_B(0) &= -D_M {}^mV_B(s) - \frac{5}{7}(\frac{d\theta_y}{dt})^2 {}^mX_B(s) + \frac{1}{M}F_{Ball}(s) \\ s{}^mX_B(s) + {}^mX_B(0) &= {}^mV_B(s) \end{aligned} \tag{3-13}$$

が得られる．図 3.2 はボールの制御フィードフォワードブロック線図である．一般的な斜面のボールの転がり問題と比較して，プレートの旋回運動による遠心力が最外周のフィードバックループに加える点が特徴であることがわかる．

3. 2. 3　高精度なジャイロセンサー

本章より，高精度なジャイロセンサーを用いた実験を遂行する．実験で使用したセンサーはクロスボー社製の慣性運動計測機器 NAV440 (表 3.1 参照)である．3 軸のジャイロ，加速計，地磁気センサー，そして GPS を先端アルゴリズムにより組み合わせ高精度なデータ出力を可能にしている．当該ユニットは，従来高価であった慣性機器を一般の運動試験・制御でも使えるようバリューエンジニアリング，ウィンドウズ操作もできるようにした新開発の汎用計測装置である．

Table 3.1 Specification of gyro sensor

	Unit	NAV440
Measuring range	°	±180
Measurment axis		Roll･Pitch･Yaw
Attitude angle		
Measuring rangle: Roll, Pitch	°	±180, ±90
Resolution	°	0.02
Azimuth angle	°	
Measuring rangle: Roll, Pitch	°	±180
Resolution	°	0.02

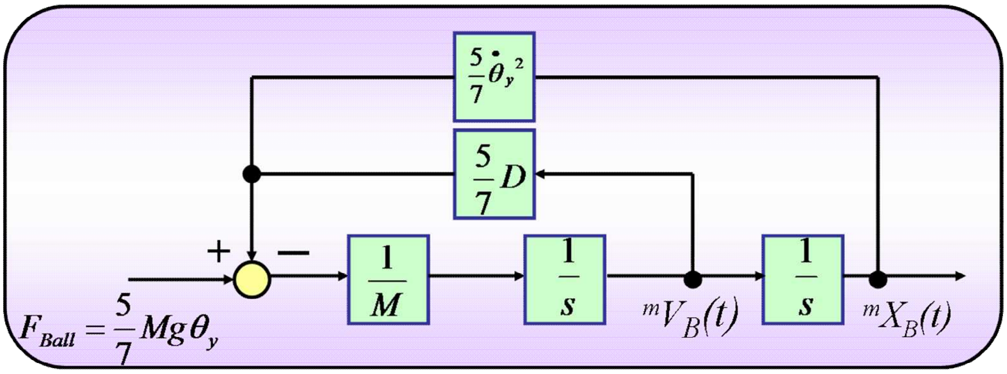


Fig.3.2 Block diagram of motion control of ball

3. 3　解析および実験結果と考察

3. 3. 1　転がり円運動モデルのシミュレーションと定常応答

図 3.2 より，F_{Ball} を入力，ボールがプレートの上の軸上で振動運動する片振幅（転がり円運動の半径）を出力とした伝達関数のボード線図（ゲインの単位は m/N）を考えることができ，その計算結果を図 3.3 に示す．図 3.3 より，プレートの旋回運動の角速度とボールがプレート上を回転する出力転がり半径と位相の周波数応答がわかる．ここで実験および計算に用いるボールは，2 章と同様である．また予備実験で実測された減衰項の値（D_M =0.5 [N・s/ m・kg]）を式（3-9）に代入して計算した．図 3.4 はプレート上に転がり円軌道（半径 R_c＝100mm の例）を生成した一例である．

3. 3. 2　ボールの転がり運動の過度応答の Z_m 方向の変位

過渡応答から定常応答に達するまでのボールの Z_m 方向の変位を調べる．2 章の 2.3.3 節の結果により，傾斜角 10°までは面全体においてボールはすべり運動を生じないことを確認している．実験においては，静止かつ水平状態にプレー

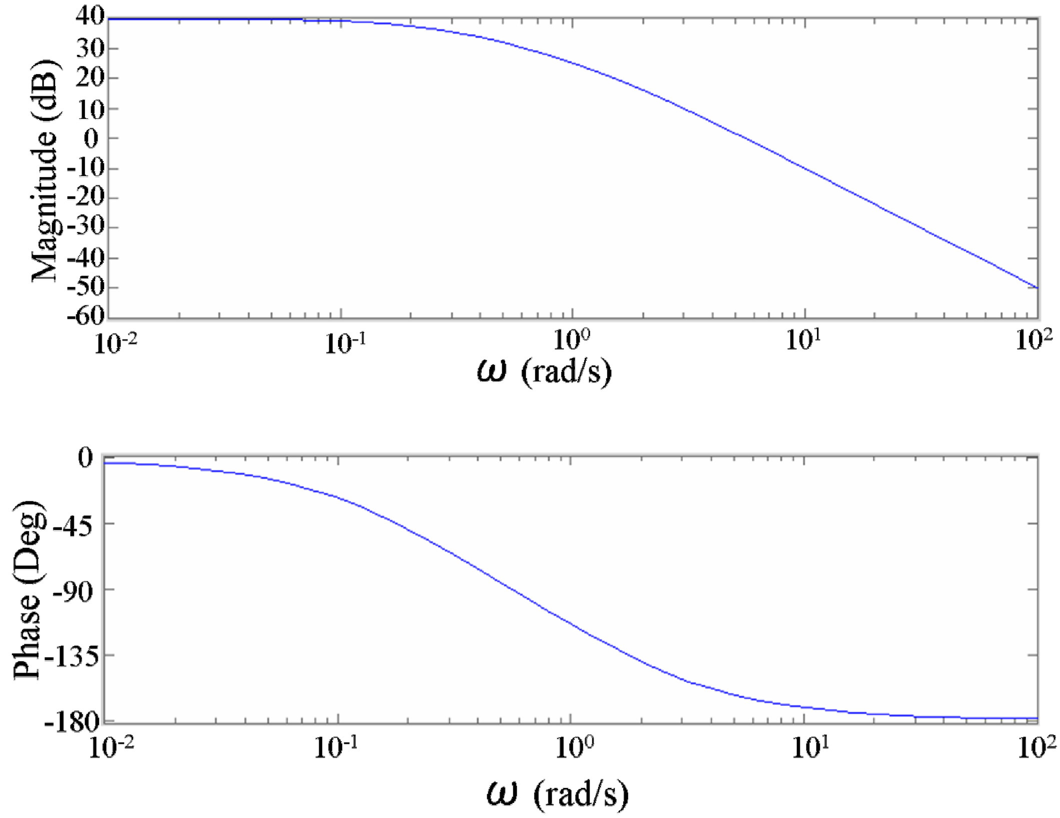


Fig.3.3 Bode diagram of ball vibration on working plate

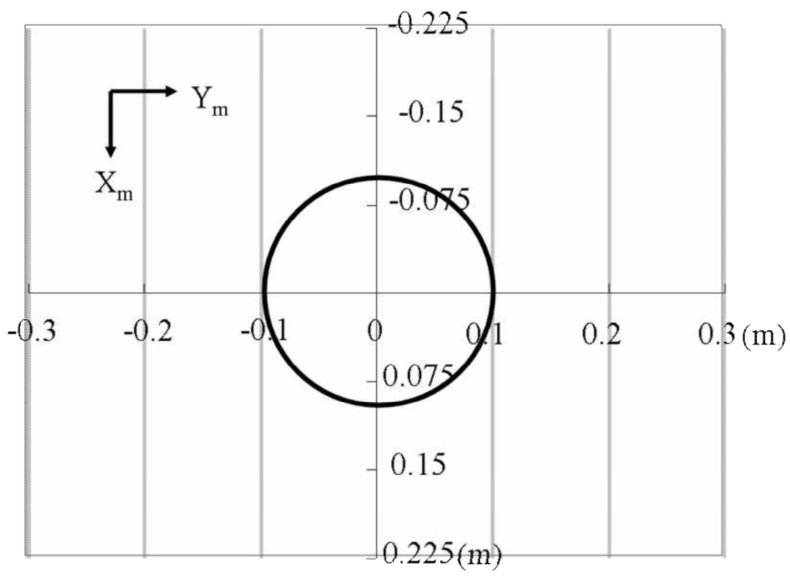


Fig.3.4 Predicted motion on working plate

トを設置し，プレートの凹凸や傾きの影響がないようにプレート平面の各部でボールを置き，ボールが自然に転がることがない状況を確認する．次にボールを初期条件として t=0 で ${}^{m}X_B$=-0.17m, ${}^{m}Y_B$ =-0.25m に置き， dx/dt=0, dy/dt=0 とする．実験におけるボールの運動軌跡は，ビデオカメラで動画を記録した後に画像処理にて解析した．カメラはプレートの真上 60cm に設置した．使用したカメラはフジフィルム社製 FinePix Z200，動画サイズ 640×480 画素で，空間分解能は 0.63mm/画素である．またフレームレートは 30fps であり，撮影された各フレーム画像を画像処理ソフト Photoshop で処理した．本実験で使ったプレートは 600×450mm であるので，定常状態における円軌道の半径 R_c＝0.05m を狙いとして，最大傾斜角 θ_0＝3°，周期 T＝2.3s（角速度 2.7rad/s）とする．本条件を用いてボールの Z_m 方向の変位を確認した．計算および実測の結果を図 3.5 に示す．図 3.5 より，運動開始から 17s 程度経過するとボールが完全に円軌道（定常運動）に入り， Z_m 方向の変位(=R_c sinθ_0) は変化しないことがわかった．またその時，ボールが円周軌道上で一定の速度でプレートを昇る安定した状態になることがわかった．また計算および実験の結果は良く一致していることもわかった．

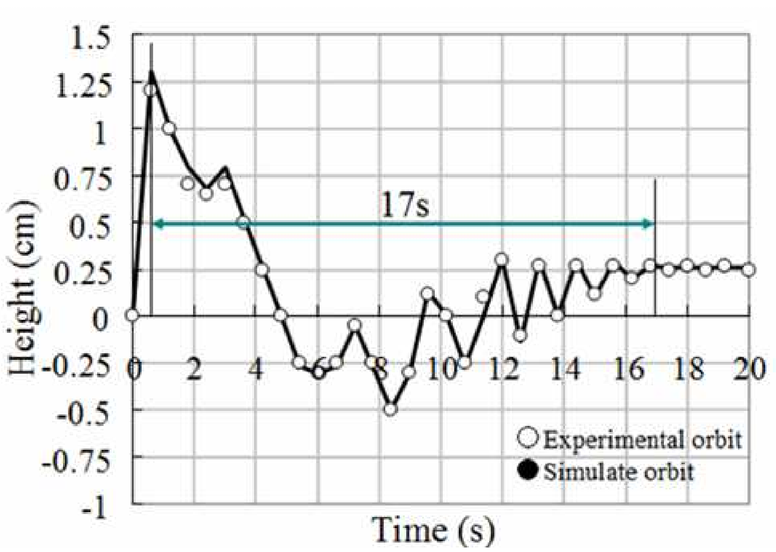


Fig.3.5 Height change of ball at Z_m direction

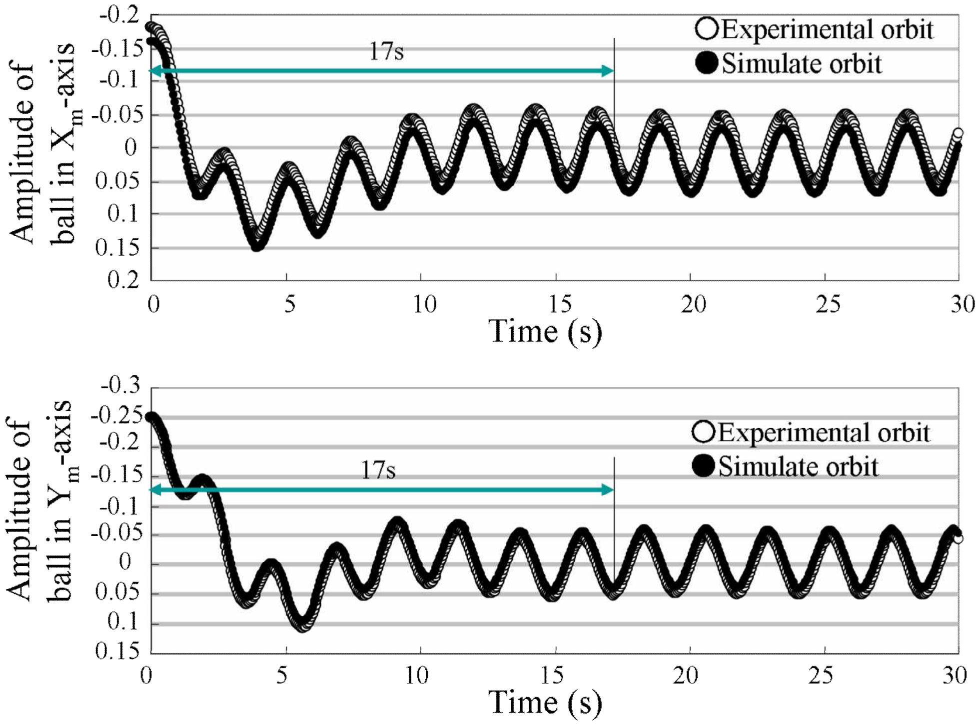


Fig.3.6 Amplitude of ball in X_m-Y_m axis

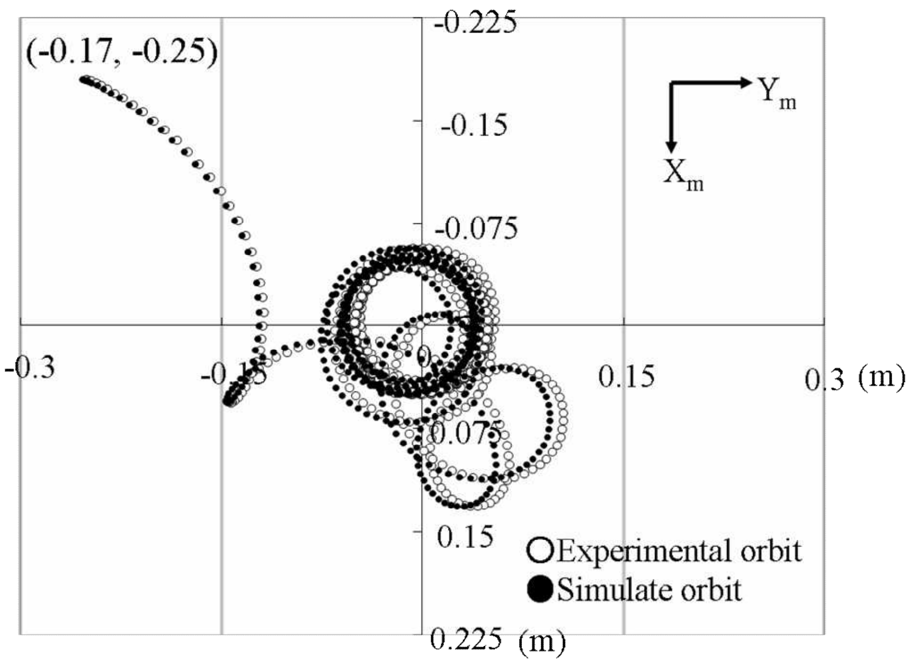


Fig. 3.7 Rolling path of experiment and simulation result

($\theta_0 = 3°$, $T = 2.3$s, $R_c = 0.05$m)

3. 3. 3 プレート X_m-Y_m 平面におけるボールの転がり運動の過度応答および X_R-Y_R 平面方向の運動誤差の影響

前節の X_m-Y_m 平面におけるボールの転がり運動を調べる．図 3.6 はボールの X_m，Y_m 軸方向の振幅変化であり，図 3.7 はその運動を合成した X_m-Y_m 平面におけるボールの静止から過渡応答を経て円運動（定常応答）になるまでの転がり軌跡である．図 3.6 より，17s 程度経過した後に定常運動となることがわかり，その経過時間は図 3.5 と一致する．図 3.7 より，実験結果および計算結果は良く一致しており，式(3-9)を基礎とするモデルで高い予想精度が達成されていることがわかる．ただし式(3-9)では，プレートにボールの転がり運動に沿って直進運動する誤差が生じる場合についての影響は考慮していない．ここで，その影響の度合いについて考える．図 3.1(a)において，プレートがボールの転がり運動平面に沿って X_{R2} の直進運動の誤差が生じるとする．その時のボールの中心の運動誤差を X_{R1} とする．簡単のため傾斜角 θ=0 とする．この時のボールの直進方向の運動方程式は,

$$M\frac{d^2X_{R1}}{dt^2}=f \tag{3-14}$$

となる．回転方向の運動方程式は式(3-2)で表される．

一方，ボールがプレート上をすべらないとすると，X_{R2} とボールの回転角 φ には

$$X_{R2}=r\varphi \tag{3-15}$$

の関係が成立する．式(3-14)，式(3-2)，式(3-15)より X_{R1} と X_{R2} の関係は，

$$\frac{d^2X_{R1}}{dt^2}/\frac{d^2X_{R2}}{dt^2}=2/5 \tag{3-16}$$

となる．すなわち，転がり運動でプレート上の直進誤差 X_{R2} の 60%は低減されるが，その 40%はボールの中心の運動誤差 X_{R1} として現れる．図 3.7 において実験と計算の結果に僅かに差があるが，これらの誤差も影響した可能性もある．

3. 3. 4　ヒトと双腕ロボットによる操り動作の比較

ここで本節では，応用を想定しているヒト型である双腕ロボットの動作における特徴と問題について着目する．図 3.8 は，図 2.1(a)中の J1～J14 までの同時 14 軸制御を実行して双腕の協調で図 2.1(b)に示す X_m 軸まわりおよび Y_m 軸まわりの同期運動（最大傾斜角 θ_0＝3°，周期 T＝3.3s すなわち角速度 1.9rad/s，半径 R_c＝0.1m の例）をプレートに与えている様子である．図には，その時のボールのプレート上の実運動軌跡も合わせて示す．その時のプレート傾斜角度をテーブルの原点に 3.2.3 節で示した最新の高精度ジャイロ角度センサーを設置して計測した結果を図 3.9 に示す．旋回の指令ブロックは，CNC の高周波の振動を抑制するため T/36 周期毎に作成した例である．

図 3.9 より, 実際のプレートの旋回運動は正弦波から僅かに誤差が生じていることがわかる．その結果，図 3.8 の実験結果におけるボールの運動軌跡にも誤差が生じている. 本例の場合, 半径方向の転がり誤差（＝実半径－R_c）は最大 10mm 程度であった．X_m 軸まわりの旋回運動は，各腕の Y_R-Z_R 平面の円弧運動の組み合わせを用いて生成している．図 2.3 および図 2.4 の Y_R-Z_R 平面における Z_R=0

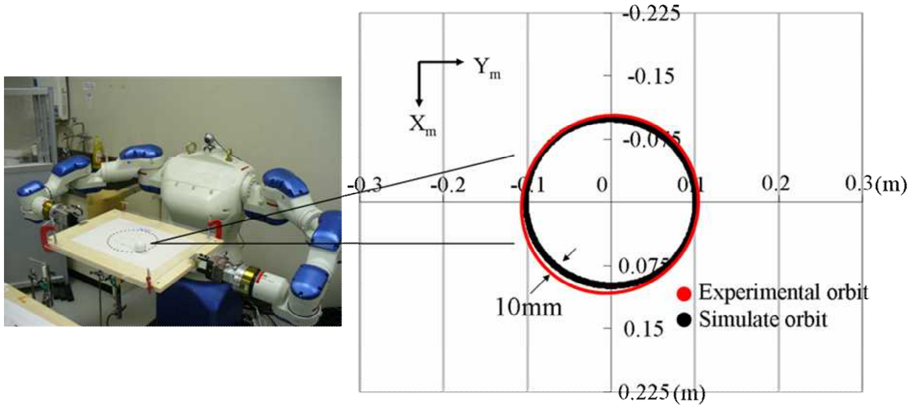


Fig.3.8 Motion error of rotating ball on working plate

付近の運動精度を見ると，ロストモーションなどもなく比較的スムーズな運動である．そのため，図 3.9 における X_m 軸まわりも傾斜角＝0°付近でもスムーズな運動であることがわかる．ここで，20 代の男性数名に本プレートに傾斜を与える動作で半径 100mm のボールの転がり円運動をした．動作を 20 回繰り繰り返し練習した後の結果を図 3.10 に示す．図 3.10 より，ヒトの操作では同様の運動の実現は難しく，ボールの転がり運動として半径差 10mm 以内での安定した運動は達成できなかった．図 3.10 の Y_m 軸まわりのデータに着目すると細かな変動がみられる．双腕ロボットなら J1 と J7 による旋回運動であり，ヒトでは手首による旋回の運動である．腕全体でプレートを操る X_m 軸まわりに比べて，Y_m 軸まわりは手首だけで微調整が可能であるため，ヒトの動作では手首の運動により系全体の微調整を行う動作を行う傾向があることが判明した．しかしながら，ヒトにはボールの運動を 2 軸の旋回運動を同期させながら正確に操る動作は難しく，本動作はヒトに対しては複雑な動作対象になることがわかった．

一方，図 3.3 の周波数応答の特性からわかるように，対象とした運動周期は固有振動周期を超えており，高い周波数に対する応答感度は低いため，実際にロボットにプレートの操りを指令するブロック長は T/16，T/8，T/4 でも結果に

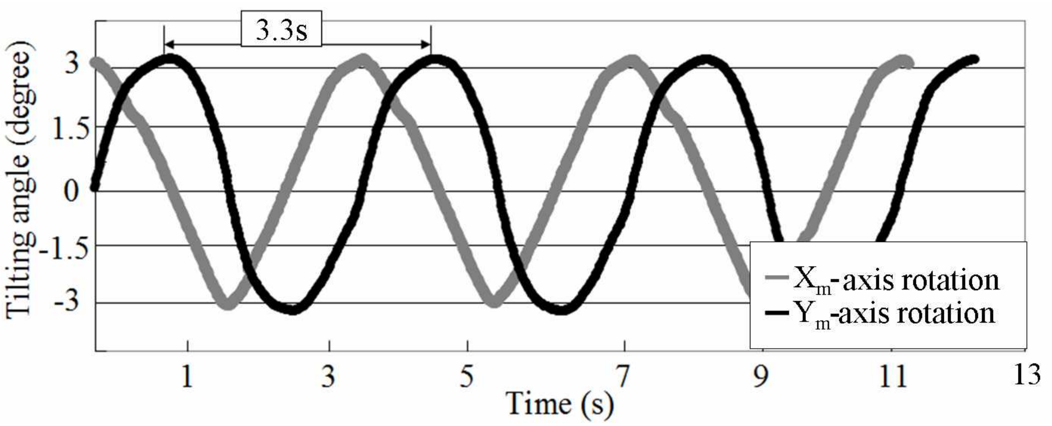


Fig.3.9 Tilting angle of working plate (36 segmentation)

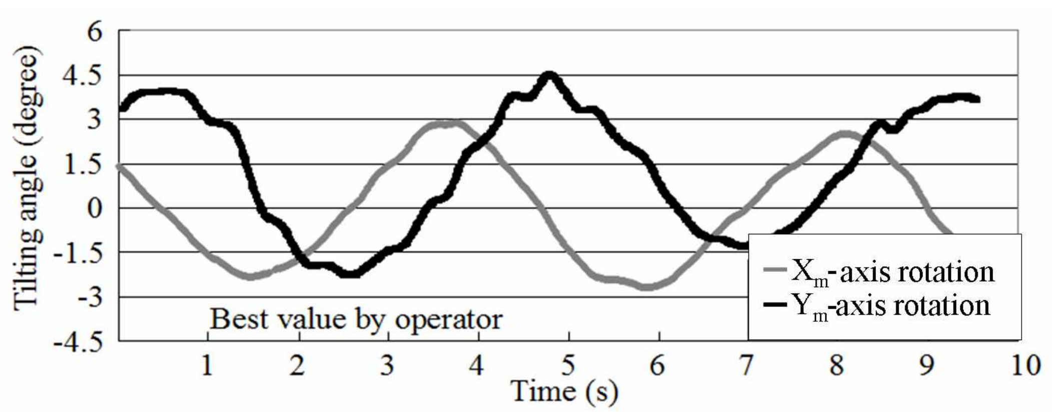


Fig.3.10 Tilting angle by operator after 20 generations

大きな差がみられなかった．　したがって現場で簡易的に評価実験する場合は，正弦波を $T/8$, $T/4$ などで直線近似してロボットにティーチングしても良いこともわかった．

3. 3. 5　運動の誤差と実際のプレートの角度運動誤差

図 3.8 に示したように，実際のボールの転がり軌跡は真円からの誤差を生じる場合が多い．そこで，逆にその誤差から同時 2 軸の旋回運動の特性を簡易的

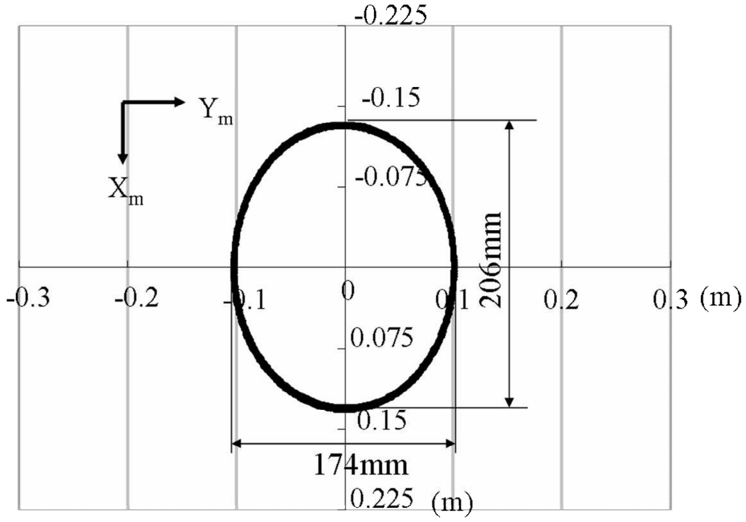
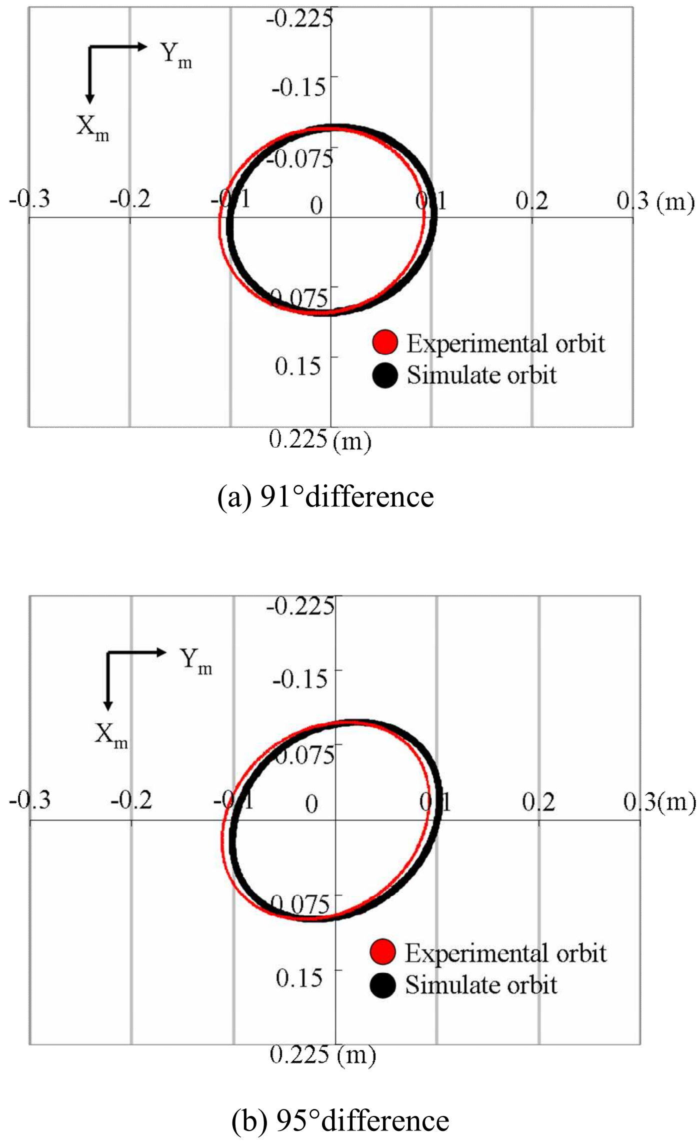


Fig.3.11 Rolling path with only angle controlling error

に診断する手法について考察する．最初に，旋回軸の制御運動において最大角度にのみ誤差を有する場合｛式(3-11)において $\varepsilon \neq 1$，すなわち 2 軸間の最大角度の不一致が生じている場合｝を考える．図 3.8 の条件において， X_m 軸と Y_m 軸での傾き角度の最大値の差が 0.5°の例（θ_{y0}＝3.5°，θ_{x0} =3°）を図 3.11 に示す．この場合，楕円軌跡になり楕円の長軸が Y_m 軸になることがわかる．しかしながら，図 3.8 は楕円軌跡の長軸が Y_m 軸または X_m 軸に沿うような形状ではない．次に 2 軸の旋回軸でドループの不一致が生じた場合を想定して，プレートの X_m 軸に対して Y_m 軸の運動の位相の差に誤差を与えた場合（α＝91°，95°）について実験と計算を行った．結果（傾斜角 θ_{y0}＝θ_{x0}＝3°, 周期 T＝3.3s, 半径 R_c＝0.1m）を図 3.12 に示す．図 3.12 より，(a)は X_m 軸に対して Y_m 軸の運動の位相の差 α＝91°の場合である．(b)は X_m 軸に対して Y_m 軸の運動の位相の差 α＝95°の場合である．このような場合，楕円の長軸が X_m 軸または Y_m 軸に対して傾くことがわかる．すなわち図 3.8 の場合，少なくとも位相の差 α にも誤差が生じている

ことがわかった．これらの結果により，ロボットの双腕協調によりプレートを操るとき，角度すなわち式（3-10)，(3-11）の θ_y と θ_x の精度，さらにドループの不一致などによる式（3-11）の位相差 α の精度の両方がボールの転がり軌跡に影響し，それぞれ特徴的な軌跡となることが示された．



(a) 91°difference

(b) 95°difference

Fig.3.12 Result of simulation and experiment (Phase difference α= 91°, 95°)

3. 3. 6　制御角度と同期誤差が転がり軌跡に与える影響と運動精度の改善方法

以上の議論より，式(3-10),(3-11)におけるプレートの旋回 2 軸間の最大回転角度の比 ε と位相 α の誤差の影響を考察する．図 3.13，3.14 はシミュレーションと実験結果を示す．図 3.11 に示されるように，位相 α=90°で最大角度にのみ誤差が生じて $\theta_y \neq \theta_x$（ε＜1）の場合，転がり軌道は楕円の長軸が X_m 軸に一致するものになる．そこで θ_{x0}＝3°に固定し，角度誤差 $\Delta\theta=\theta_{y0}-\theta_{x0}$，$\theta_{y0}+\theta_{x0}=6°$，即ち（1+$\varepsilon$）$\theta_{y0}$＝6°の二つの条件で，楕円軌道の長軸の長さ b と短軸の長さ a の差 Re=2(b-a)と角度誤差 $\Delta\theta$ の調べた結果を図 3.13 に示す. 長軸と短軸の差 Re が角度の誤差 $\Delta\theta$ の増加により直線状に増加し, 角度誤差の条件が変わるとその直線の傾きが変化することがわかる．一方，旋回運動における 2 軸間の旋回位置ドループの不一致などにより X_m 軸まわりと Y_m 軸まわりの位相ずれが 90°でない場合（ここで, 同期誤差 $\Delta\alpha=\alpha$-90°とする）のボールの運動軌跡は図 3.12 である. そこで長軸の X_m 軸に対する傾斜角を β とすると，$\Delta\alpha$ と β の関係は図 3.14 のようになった. その楕円軌道の長軸の長さ b'と短軸の長さ a'の差 Re'=2(b'-a')として図に合わせて示してある．図 3.14(a)により，同期誤差 $\Delta\alpha$ の増加により β は指数関数的に増加することがわかった. しかしながら $\Delta\alpha$ の値が 20°以上の場合, β は 45°に収束することもわかった．図 3.14(b)により, 斜め楕円の長軸と短軸の差 Re'は同期誤差 $\Delta\alpha$ の増加によりほぼ直線的に増加することもわかった.

さらに角度誤差 $\Delta\theta$ と同期誤差 $\Delta\alpha$ が同時に存在する場合を考える．例えば $\Delta\alpha$=15°，$\Delta\theta$=1°, 2°の場合の実験とシミュレーション結果を図 3.15 に示す．同期誤差 $\Delta\alpha$ が存在すると，楕円の長軸の X_m 軸に対する傾斜角 β が生じ，さらに角度誤差により楕円の長軸と短軸の比が変化する様子がわかる. 同期誤差 $\Delta\alpha$ が一

定として，角度誤差 $\Delta\theta$ が変化する場合の長軸と短軸の差 Re”の変化（θ_{x0}＝3°固定，$\Delta\theta$=θ_{y0} –θ_{x0}，と（1+ε）θ_{y0}＝6°の条件で）を図 3.16 に示す．図 3.16 より，角度誤差 $\Delta\theta$（=0～6°）に対して，長軸と短軸の差 Re”は直線的に増加することがわかる．図 3.17 は，角度誤差と同期誤差が同時に存在し，同期誤差が一定の場合，角度誤差の変化による楕円と X_m 軸との傾斜角 β の変化である．β は図 3.14(a)の 45°の結果を起点として直線に増加することがわかり，最後に長軸は Y_m 軸と平行になることがわかった．

以上より，式(3-10)，式(3-11)を基本として直交する 2 軸旋回の角度運動を三角関数で考え指令することで，2 軸旋回運動のドループの不一致などに起因する同期誤差 $\Delta\alpha$ が存在すると転がり楕円はプレート上の X_m 軸または Y_m 軸に対して傾斜角 β を生じことがわかる．現場的には，もしそのような楕円ならば同期誤差 $\Delta\alpha$=0 になる様に調整し，傾斜角 β=0 を目指すと良い．その後でも，X_m 軸または Y_m 軸に沿った長軸で楕円運動の軌跡が残るようなら, 基本的に角度誤差 $\Delta\theta$ が生じている．その場合には，さらに指令の最大回転角度 θ_y または θ_x を調整すれば良い．したがって，プレートの旋回 2 軸運動においてボールがプレート上を転がる運動の軌跡をモニターすることにより，簡易的にその運動の診断と改善ができることがわかった．

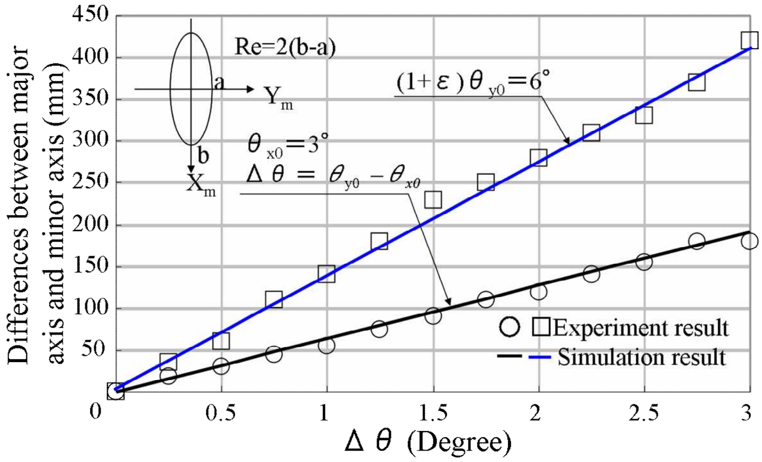
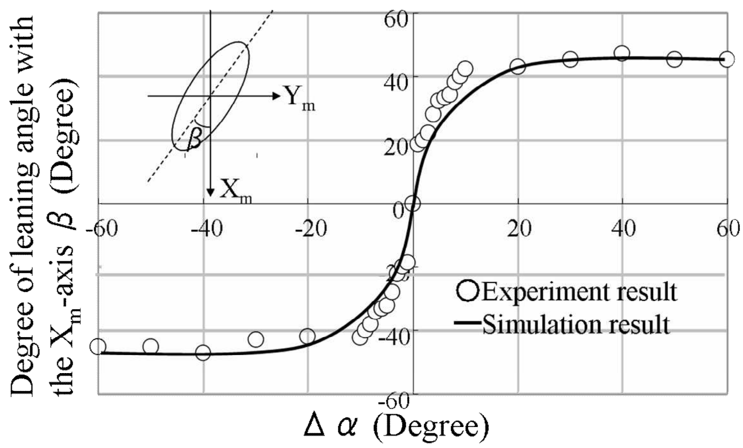
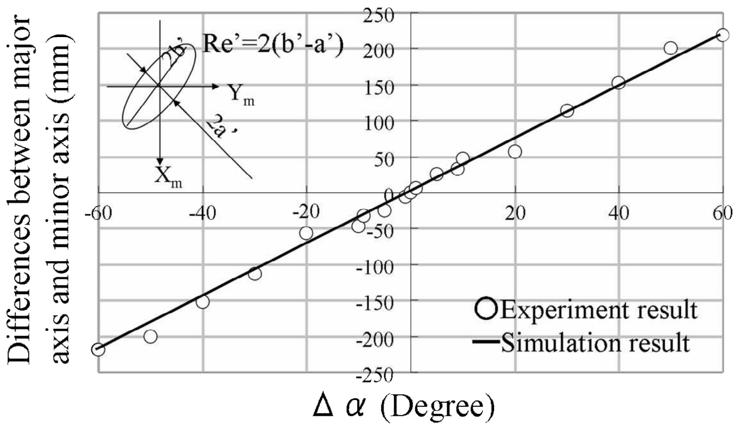


Fig. 3.13 Influence of operating angle on circular orbit

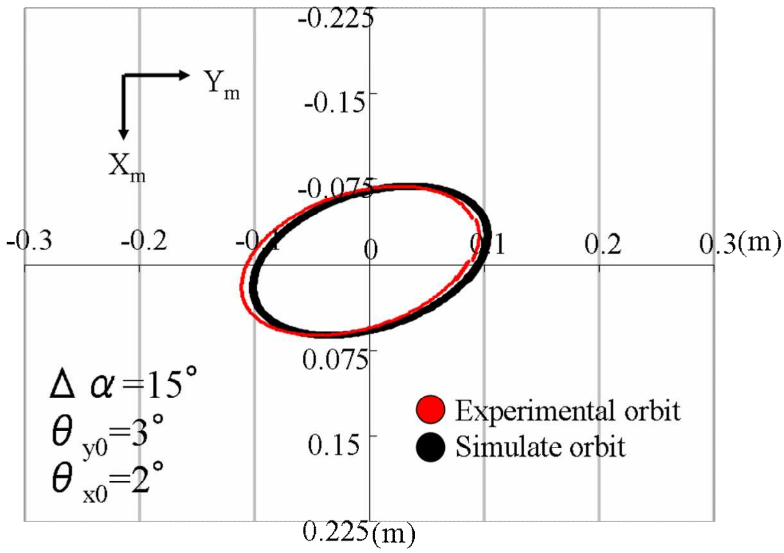


(a)

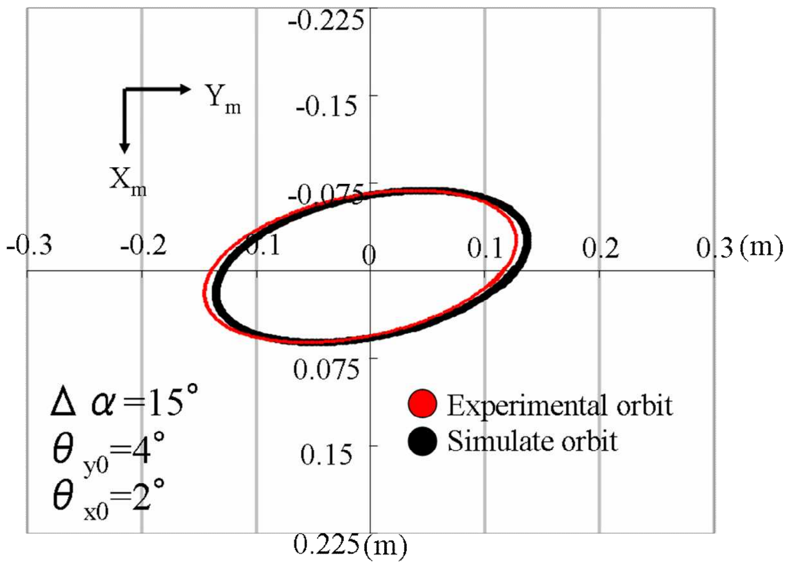


(b)

Fig. 3.14 Influence of degree of leaning angle with X_m-axis on synchronous control angle



(a)



(b)

Fig. 3.15 Result of simulation and experiment
(Synchronic error $\Delta\alpha$=15°, Phase difference $\Delta\theta$=1°, 2°)

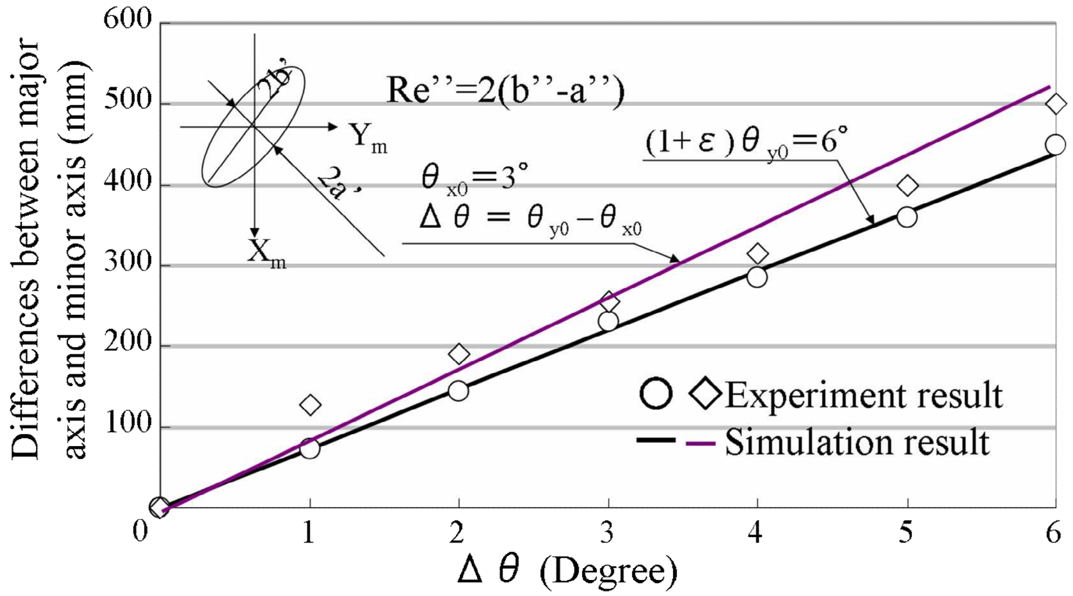


Fig. 3.16 Influence of angle error and synchronous error on circular orbit

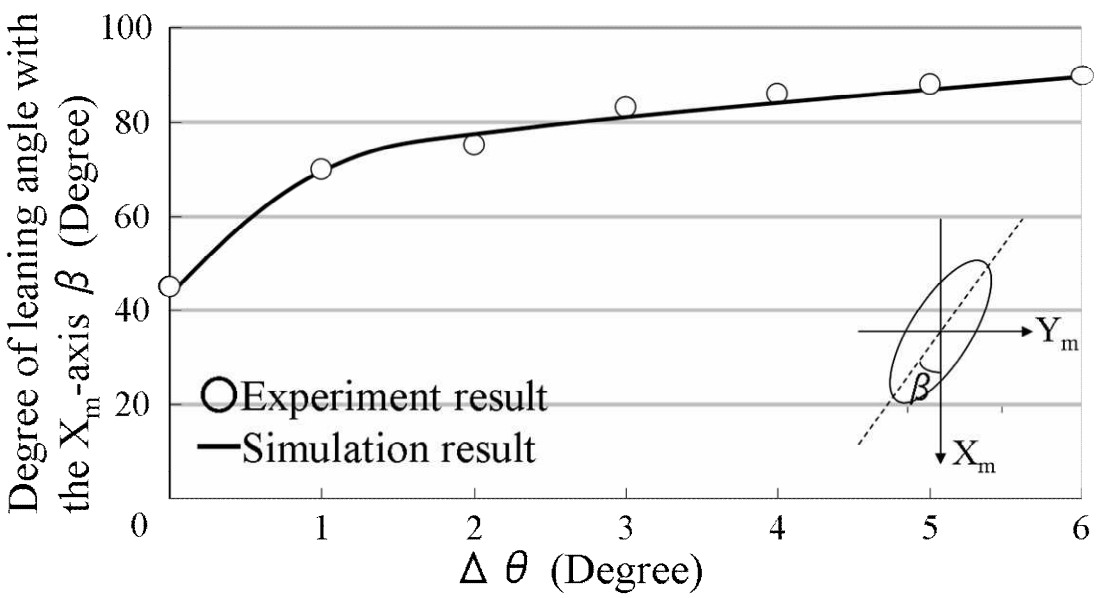


Fig. 3.17 Influence of degree of leaning angle with X_m-axis
on angle and synchronous error

3. 3. 7　狙いとした半径と減衰係数を変化させた場合の考察

図 3.3 のボード線図より，旋回軸の角周波数が非常に小さい場合などではボールはプレートの大きさを超える非常に大きな半径で転がり運動を行うことがわかる．その場合には，現場でボールの転がり軌跡をモニターすることができない．一方，式(3-9)より減衰係数の値はボールの転がり半径を影響することがわかるので，D_M（D_M＝D/M ）と転がり半径の関係を調べる．傾斜角 θ_0＝3°，周期 T＝3.3s の場合の結果を図 3.18 に示す．図 3.18 より，同条件で転がり軌跡の半径を小さくしたい場合は減衰係数が非常に大きくなるボールとプレートの組み合わせを用いればよいことがわかる．プレートの表面を前節までのアクリル板からカーペットに変更すれば，実測によると D＝0.13，D_M＝4 [N・s/ m・kg] 程度にまで減衰係数を高くすることができた．すなわちこの様な手法により，転がり半径 R_c ＝0.1m から R_c ＝0.01m 程度にまで小さくできることがわかる．一般に転がり抵抗は接触する物体間の組み合わせやボール半径によって変化することが知られている．したがって減衰係数を調べる予備実験が必要になるが，プレートとボールの組み合わせを工夫することで，プレートの大きさ，旋回運動の角周波数，最大角度が変化しても，本手法はある程度対応できるものと考えられる．また本章では，双腕ロボットを用いたプレートの操り動作で実験を遂行したが，提案する手法はテーブル 2 軸旋回タイプの運動系に対して広く応用が可能である．

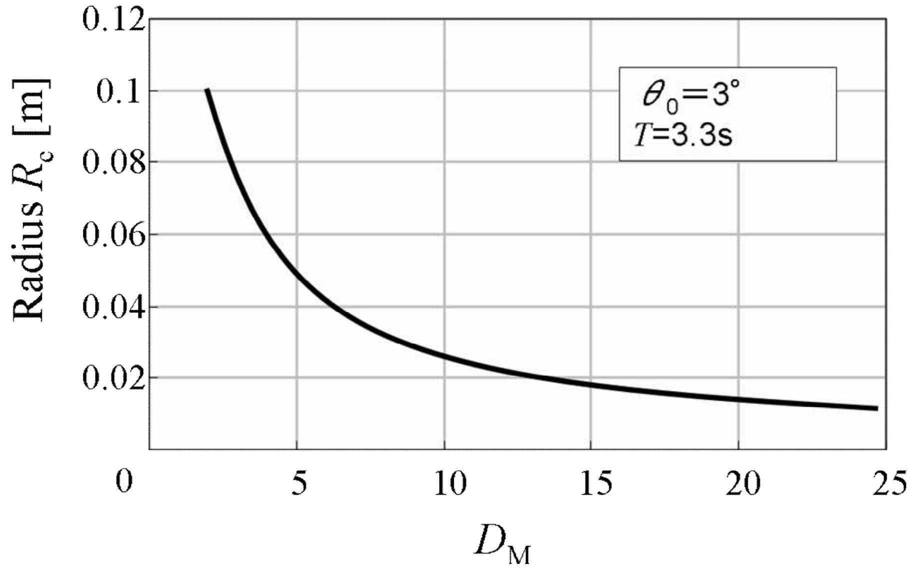


Fig.3.18 Radius change by damping

3.4　結　　言

双腕ロボットに作業プレートを支持して，拡張した運動方程式に基づきそのプレート上でボールが等速円運動するように双腕の協調で同時 2 軸の旋回運動する指令を与えた．その時に生じるボールの実転がり運動軌跡を解析することで，プレートの旋回運動の精度との関係を考察した．その結果，以下の結論を得た．

(1)　ボールの転がり運動においてプレート回転による遠心力を考慮することで，転がり運動の過渡応答から定常応答まで，それらの軌跡を精度よく予想できることがわかった．

(2)　同時 2 軸の旋回運動において，プレート上のボールの運動軌跡が楕円で

その長軸が X_m 軸または Y_m 軸と一致する場合，両軸間で最大角度に誤差が生じている．一方，楕円の長軸が X_m 軸または Y_m 軸と角度を有する場合，ドループの不一致などに起因する位相誤差が生じていることが計算および実測から示された．

(3)　モデルによるシミュレーションを併用すれば，ボールの転がり軌跡をモニターすることで，簡易的ではあるが，同時 2 軸で旋回運動するプレートの運動特性の改善のための有効な手法の 1 つになるものと考えられる．

(4)　また本手法は，使用するプレートとボールの組み合わせを工夫することで，プレートの大きさ，旋回運動の角周波数，最大角度が変化しても，本手法はある程度対応できるものと考えられる．

第 4 章　使用するボールの影響および双腕ロボットを用いた検証

4.1　緒　　　言

FA(Factory Automation)技術において，産業用の多関節ロボットによる運動は作業の自由度が大きいが，アームの支持剛性が低いためにテーブルを保持し，そのテーブル上で作業を遂行するような動作には向かないとされてきた．そのために，そのような作業ではパラレルメカニズム型を採用して支持剛性と運動精度を確保する場合(31)が多かった．そこで 2 章および 3 章では，近年開発された多関節ロボットアームを各腕として構成された双腕ロボットに着目して，両腕で作業プレートを保持することで閉リンク構造を具現化でき，ある程度の支持剛性の確保が可能で，人の動作に近い範囲において作業用としても実用性があること示した(32).

ここで，双腕ロボットの両腕で作業プレートを支持する手法では，自由度が比較的高く空間上でプレートに直進運動および旋回運動を与えることが可能である．ここでその運動精度の診断方法を考える．直交する直進運動を組み合わせて創成される任意の 2 次元の運動軌跡に対しては，交差格子スケールを用いる手法が有効である(33)．直進運動または直進運動と旋回運動を組み合わせて空間上に円運動が創成可能な場合，ダブルボールバー法（DBB 法）が有効であることが知られている(7)(34)．すなわち，これら多軸の同期運動については数多くの研究報告がなされており，その診断手法の発達と共に運動の高速・高精度化が達成されてきている．その一方で，旋回軸だけで 2 軸の旋回運動を組み合わせるプレートの運動誤差を評価する手法に関する研究報告が少なく，プレート

上に高精度のジャイロ角度センサーを設置して計測する程度しか手段がなかった．

そこで前章では，現場で簡易的に 2 軸同期の旋回運動の運動誤差を診断する方法として，作業プレート上に円軌道のボールの転がり運動を創成し，基準円に対する転がり運動誤差を用いる新しい手法を提案し，シミュレーションおよび実験の両面よりその有効性および実用性を確認した(35)．しかしながら，転がり運動に用いるボールの特性と運動誤差の検出感度の関係については解明できていなかった．したがって，必要とされるプレートの旋回運動に合わせた転がりボールの選定指針が不明確であった．さらに 2 軸の旋回運動軸の中心が，ボールの転がり運動の中心と一致する場合にのみ考察を遂行していた．そのため，旋回軸の旋回運動にオフセット角度誤差が存在する場合についての特性までは扱っていなかった．本章(36)では，提案する手法において使用する転がりボールの特性を変化させた場合を取り上げ，診断に用いる適切なボールの選定に関する考察を行う．さらに旋回軸の旋回運動にオフセット角度誤差が存在し，ボールの転がり運動の中心と旋回軸の旋回中心が一致しない場合について取り組む．以上の結果より，作業プレートを同時 2 軸制御で旋回運動させる場合について，より一般性の高い現場における簡易的な運動精度の診断法について考察を遂行する．

4. 2　ボールの慣性モーメントの変化を考慮した基本理論

4. 2. 1　基本モデルと提案手法

前章で提案した手法は，直交する旋回軸においても同様に考え，一方の旋回軸に正弦関数 $\theta_0\sin\omega t$，他方の旋回軸に余弦関数 $\theta_0\cos\omega t$ で角度指令（ここで θ_0

は最大傾斜角）を与える手法である．そのような指令で 2 軸同期の旋回運動するプレート上にボール置くと，そのボールはそのプレート上で転がり円運動する点に着目し，そのボールの運動軌跡から同時 2 軸制御の旋回運動の運動誤差を診断するものである．

プレート上のボールの運動（第 3 章の 3.2.1 に参照）は，すべり運動と異なり，転がり運動においては用いるボールの慣性モーメントが運動の特性に影響する．そこで，ボールの内径 a，外径 r，その密度を ρ とすると，ボールの重心の運動方程式は

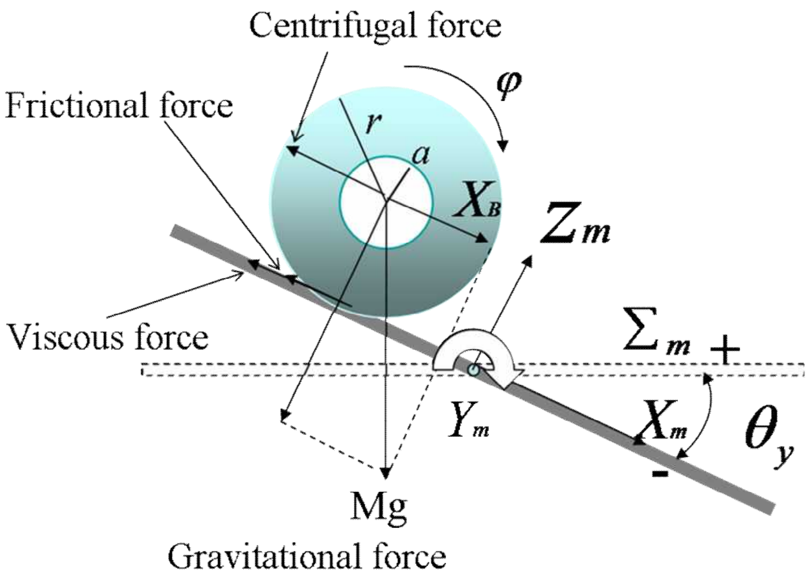


Fig.4.1 Sectional view in two dimensional coordinate plate

式(3-1)となる．ここでボールの質量は M=4$\pi\rho$(r^3-a^3) /3 であり，前章[35]では中実のみを考えたが，本章では一般性の拡張を考慮して中空ボールを考える．密度一様な中空球体の慣性モーメント I＝2M(r^5-a^5)/5(r^3-a^3)であるので(3-6)式を(3-4)式に代入して整理すると，プレートの操りによる斜面を転がるボールの運動方程式[25] [26] [35]は

$$\frac{7r^5-5a^3r^2-2a^5}{5(r^3-a^3)r^2}M\frac{d^{2\,m}X_B}{dt^2}=Mg\sin\theta_y-D\frac{d^mX_B}{dt}-M^mX_B(\frac{d\theta_y}{dt})^2 \tag{4-1}$$

$$\frac{7r^5-5a^3r^2-2a^5}{5(r^3-a^3)r^2}\frac{d^{2\,m}X_B}{dt^2}=g\sin\theta_y-D_M\frac{d^mX_B}{dt}-{}^mX_B(\frac{d\theta_y}{dt})^2 \tag{4-2}$$

と表される.

ここで，$I_e=\frac{7r^5-5a^3r^2-2a^5}{5(r^3-a^3)r^2}$ とすると，ボールの X_m-Y_m 平面における運動方程式は

$$I_e\begin{bmatrix}\dfrac{d^{2m}X_B}{dt^2}\\ \dfrac{d^{2m}Y_B}{dt^2}\end{bmatrix}=g\begin{bmatrix}\theta_y\\ \theta_x\end{bmatrix}-D_M\begin{bmatrix}\dfrac{d^mX_B}{dt}\\ \dfrac{d^mY_B}{dt}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}{}^mX_B(\dfrac{d\theta_y}{dt})^2\\ {}^mY_B(\dfrac{d\theta_x}{dt})^2\end{bmatrix} \tag{4-3}$$

$$\theta_y(t)=\theta_{y0}\sin(\omega t) \tag{4-4}$$

$$\theta_x(t)=\theta_{x0}\cos\omega t=\theta_{x0}\sin[\omega t+\alpha]=\varepsilon\theta_{y0}\sin[\omega t+\alpha],(0<\varepsilon) \tag{4-5}$$

と示される.

また身の回りで容易に入手可能な点を考慮して，実験に用いたボールは，ボール式パソコン用のマウスに用いられるマウスボール（外径 22mm の中実鋼球に薄くゴムコートされたボール，質量 31g，真球度±0.05mm）およびパチンコボール（外径 11mm，質量 5g，真球度±0.05mm）である.

4. 2. 2　減衰項の算出

第 2 章の 2.3.2 の方法に基づいて, 式(2-18)および(2-19)より算出した. ここで, $k_k=5Mg/7\{(\Phi/2)-r\}$は見かけの剛性である. 第 2 章では遠心力を考慮しないマウスボールの場合の結果は D=0.053 で，パチンコボールは 0.0017 であった．すなわち，これらは見かけの剛性 $k_k=5Mg/7\{(\Phi/2)-r\}$だけを考慮して計算した結果である．さらに遠心項を入れた式(4-3)によるモデル[35]はボールの定常運動だけでなく過渡応答も含めて精度よく算出でき，この場合の見かけの剛性はボールの質量と回転角速度に関係する $k'_k= M(d\theta/dt)^2-5Mg/7\{(\Phi/2)-r\}$と考えられる．そこで，上記と同じ実験で得られた振幅の測定結果を用いて同様に各振幅を式(2-18), (2-19)に代入して遠心項を入れた式(4-3)における減衰係数の計算結果は，マウスボールの場合 D=0.016 で，パチンコボールは 0.000628 であった．本章は以下，後者の近似法に基づく減衰係数を用いる.

4. 2. 3　ボールの運動制御とその状態方程式

4.2.2 節でボールの X_m-Y_m 平面における運動方程式を考えた．前章と同様にその状態方程式を考える．運動方程式(4-2), (4-3)よりボールの駆動力は作業プレートの傾斜により与えられている. ここで, ボールの駆動力を F'_{Ball} とすると, $F'_{\mathrm{Ball}}=5(r^3-a^3)r^2/(7r^5-5a^3r^2-2a^5)Mg\theta$ が得られる. ボールは X_m,Y_m 軸上ではどちらも単振動する点は同じなので, ここは X_m 方向だけ考える. 方程式(4-2)より変形して ${}^{m}V_B$ はボールの速度とし，ボールの X_m 方向の状態方程式は

$$\begin{bmatrix} \dfrac{d^mV_B}{dt} \\ \dfrac{d^mX_B}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{I_e}\begin{bmatrix} -D_M & -(\dfrac{d\theta_y}{dt})^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} {}^mV_B \\ {}^mX_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/M \\ 0 \end{bmatrix} F'_{Ball} \tag{4-6}$$

となる．両辺をラプラス変換して

$$
\begin{aligned}
&s^{m}V_{B}(s)+^{m}V_{B}(0)=\frac{1}{I_{e}}\left\{-D_{M}\,^{m}V_{B}(s)-(\frac{d\theta_{y}}{dt})^{2}\,^{m}X_{B}(s)\right\}+\frac{1}{M}F'_{Ball}(s) \\
&s^{m}X_{B}(s)+^{m}X_{B}(0)=^{m}V_{B}(s)
\end{aligned}
\tag{4-7}
$$

が得られる．式(4-7)より，系のブロック線図は図 4.2 に示す．図 4.2 を考えると，最外周のフィードバックループに慣性モーメントの項が影響することがわかる．

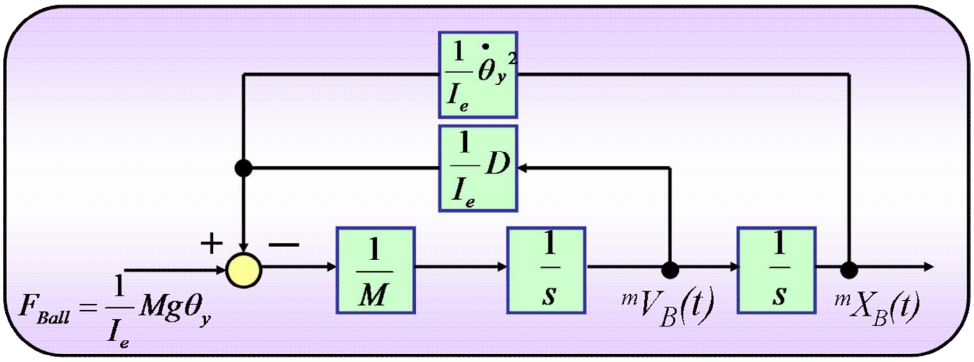


Fig.4.2 Block diagram of motion control of ball

4. 3　解析および実験結果と考察

4. 3. 1　使用するボールの違いとボールの転がり円運動の周波数応答

式(4-3)，(4-4)，(4-5)より中空，中実のマウスボールとパチンコボールを用いた場合について，プレート上の転がり軌道計算を行い，定常応答時の周波数応答の特性を考察する．図 4.3 は，図 2.1(b)に示す X_m 軸まわりおよび Y_m 軸まわりの同期運動（最大傾斜角 θ_0＝3°，周期 T＝3.3s すなわち角速度 1.9rad/s，α＝90°，θ_{y0}＝θ_{x0} の例）をプレートに与えている様子である．図には，各ボールのプレート上の転がり運動軌跡の計算結果を示す．結果より，中空のボールを使い慣性

モーメントが変わる場合とパチンコボールを使い質量と減衰係数（ダンピング）が変わる場合，それぞれボールの転がり運動の定常応答が変わり，質量，慣性モーメントと減衰係数が小さい程その振幅の応答性が高いことがわかる.

次に式(4-3)より，同じ外径と材質のマウスボールで内径と外径の比が変化する場合ボールの慣性モーメント，駆動力($Mg\theta$ の前の係数$=F'_{\mathrm{Ball}}/Mg\theta$)と M/I の関係を計算した．結果を図 4.4, 4.5, 4.6 に示す．図 4.4 より，ボールの内径と外径の比が 0.8 程度になると慣性モーメントが中実より 30%程度減少し，さらに内径と外径の比が 0.8 から 0.99 に変化するとボールの慣性モーメントがさらに急激に減少することがわかる．また図 4.5, 4.6 より，ボールの内径と外径が変化するとボールの駆動力は 0.714 から 0.6 までに緩やかに減少し，M/I の変化も 0.00005 から 0.00008 まで緩やかに増加することがわかる.

式(4-7)より，ボールの駆動力 F'_{Ball} を入力，ボールがプレート上の各軸上で振動運動する片振幅（転がり円運動の半径 R_c）を出力とした伝達関数のボード線図（ゲインの単位は m/N）を考え，その計算結果を図 4.7 に示す．図 4.7 より，プレートの旋回運動の角速度とボールがプレート上を回転する出力転がり半径と位相の周波数応答がわかる．ここで計算に用いるボールは，マウス用の中実鋼球および中空，さらにパチンコボールで，4.2.2 節で得られた減衰係数の値（中実マウスボールの場合 D_M =0.5 [N・s/ m・kg]，パチンコボールの場合は 0.126 [N・s/ m・kg]である）をそれぞれ用いて計算した． マウスボールの中実と中空で比較すれば，中空を用いることで周波数特性が比較的フラットな応答になることがわかる．ただしボールの内径と外径の比が 0.5 程度では中実の場合と大差なく，図 4.4, 4.5, 4.6 の結果も考慮すると，中空化の効果を生かすにはその比 0.8 以上のものを用いる必要があることもわかる．中実のマウスボールとパチンコボールを比較すると，パチンコボールは質量が小さく，かつ D_M も小さいために高い

応答性を示す一方で共振現象もみられる．したがって，高い周波数帯まで十分な応答特性を確保したい場合，外径が大きな中空のボールを選択すると良いことがわかる．

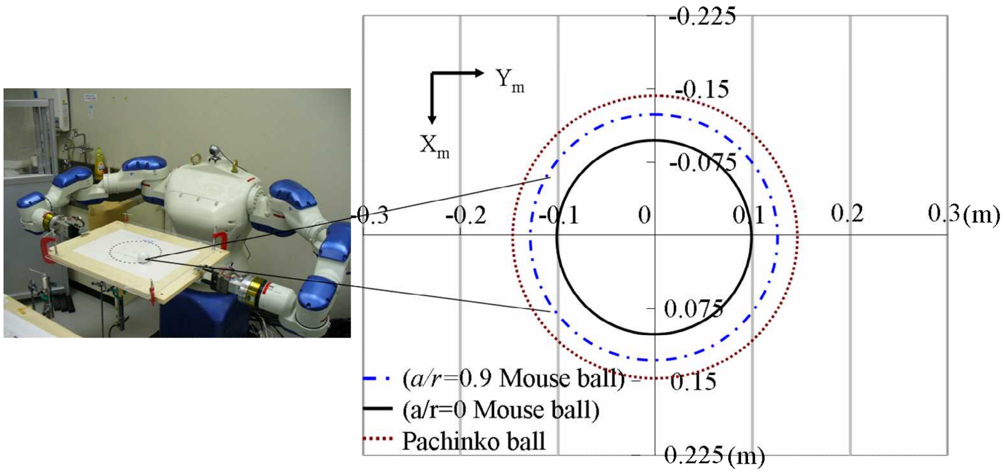


Fig.4.3 Rolling ball path on working plate by simulation

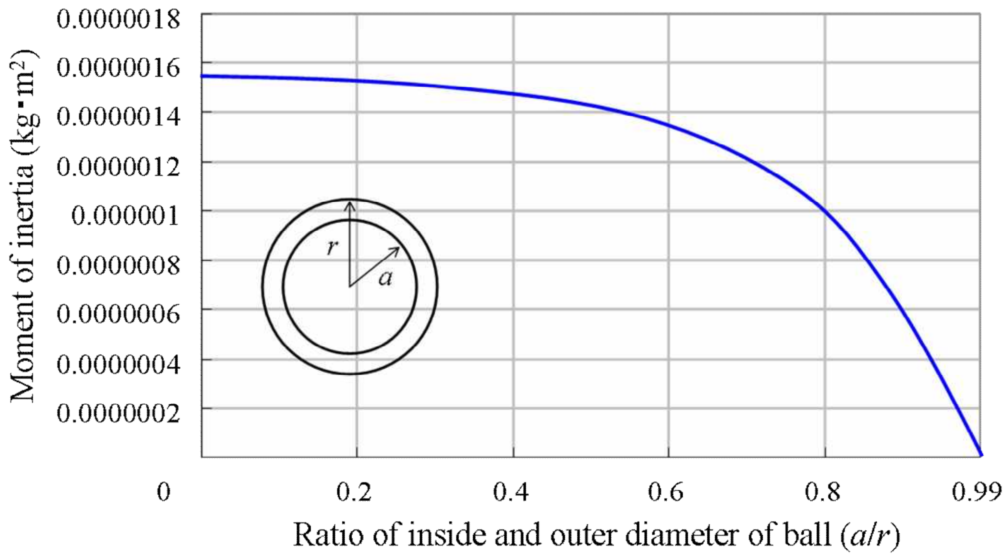


Fig.4.4 Relationship between moment of inertia and ratio of inside / outer diameter of ball

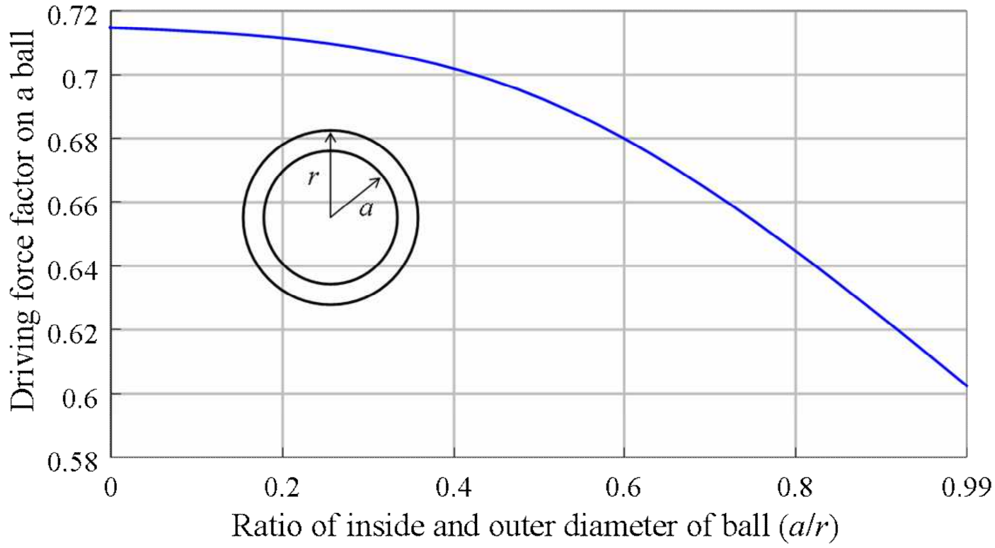


Fig.4.5 Relationship between driving force on a ball and ratio of inside / outer diameter of ball

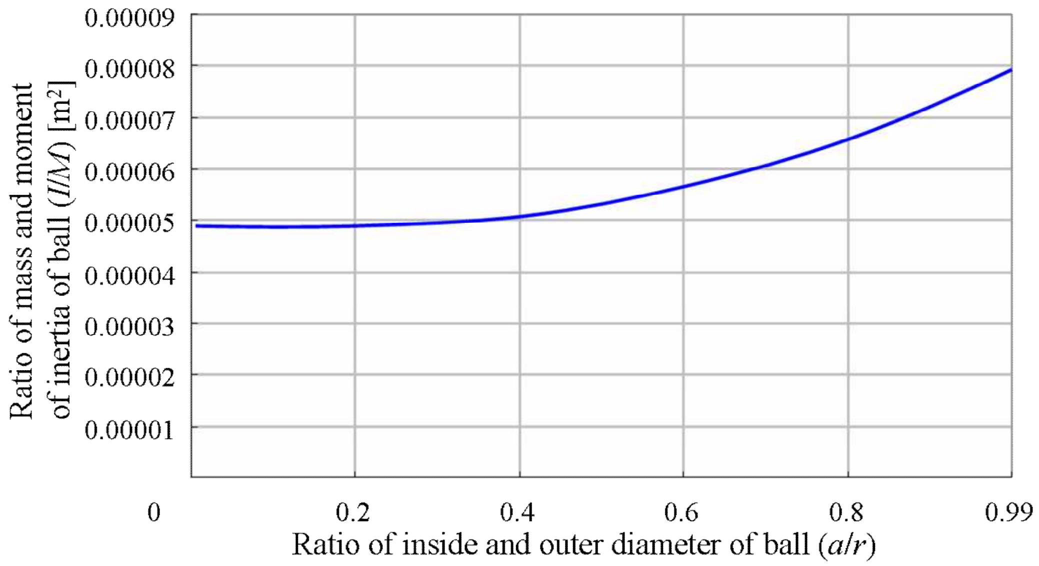
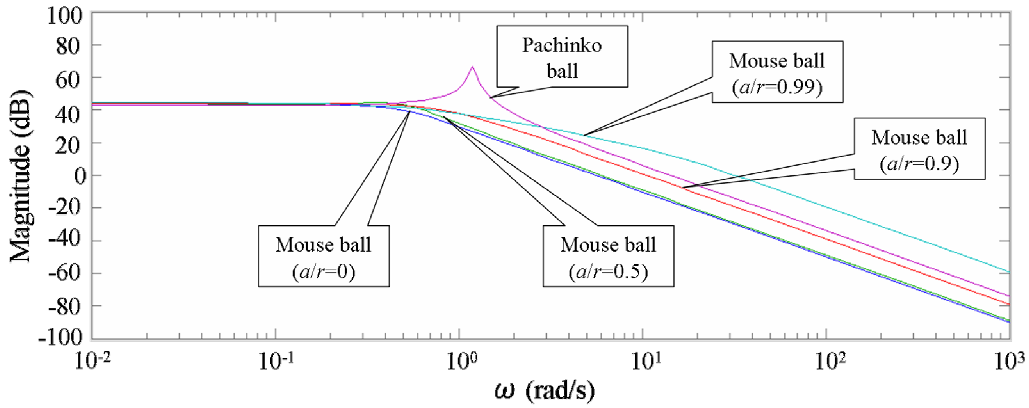
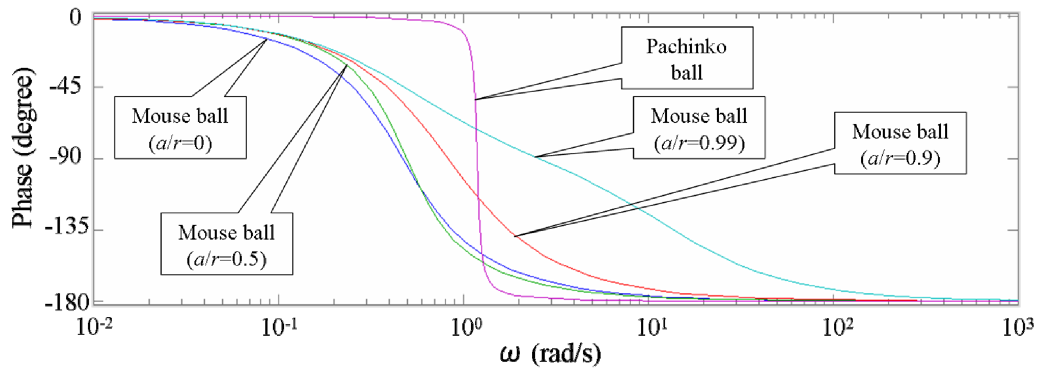


Fig.4.6 Relationship between ratio of I/M and ratio of inside / outer diameter of ball



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig.4.7 Bode diagram of ball rolling motion on working plate

4. 3. 2　プレート X_R-Y_R 平面方向の運動誤差の影響

本手法は旋回運動の運動誤差を扱っているが，実際には直進運動による外乱も考慮しておく必要がある．そこで前章ではその影響について中実のマウスボールを対象にして検討した．本章では，中空のマウスボールを用いた場合を対象にして，その外乱の影響について検討する．図 4.8 に示す水平の二次元振動モデルにおいて，プレートが平面に沿って X_{R2} の直進の運動誤差が生じるとする．その時のボールの中心の運動誤差を X_{R1} とする．簡単のため傾斜角 θ=0 とする．

この時のボールの直進方向の運動方程式は，式(3-14)となる．回転方向の運動方程式は式(3-2)で表される．一方，ボールがプレート上をすべらないとすると，X_{R2} とボールの回転角 φ には式(3-15)の関係が成立する. 式(3-14), 式(3-2), 式(3-15)より X_{R1} と X_{R2} の関係は,

$$\frac{d^2 X_{R1}}{dt^2} / \frac{d^2 X_{R2}}{dt^2} = \frac{2}{5} \frac{r^5 - a^5}{(r^3 - a^3) r^2} \tag{4-8}$$

となる．その $2/5(r^5-a^5)/(r^3-a^3)r^2$ はボールの中心の運動誤差 X_{R1} として現れる．すなわち，中実(a=0)の場合の転がり運動でプレート上の直進誤差 X_{R2} の 60%は低減され，その 40%だけがボールの中心の運動誤差 X_{R1} として現れる．一方，中空ボール内径と外径の比 a/r の値が 0（中実）から 0.99 まで変化する場合について，（X_{R1}/X_{R2}）の関係を調べた結果を図 4.9 に示す．図 4.9 より，中空になれば（X_{R1}/X_{R2}）の値が大きくなり，直進の運動誤差の影響を受けやすくなることがわかる．したがって，旋回運動中に生じる直進の運動誤差による外乱の影響を抑えたい場合には，中実のボールを採用する必要があることもわかった．

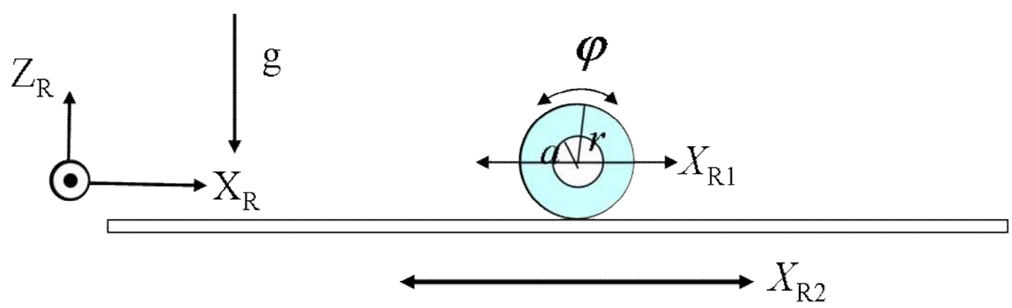


Fig.4.8 Influence of ball by vibration of plate in linear motion on the motion of ball center

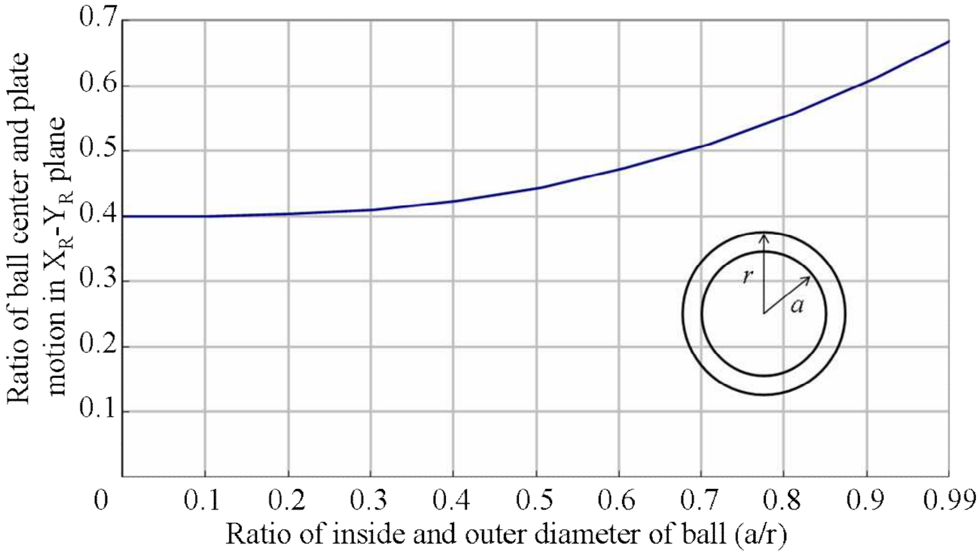


Fig.4.9 Influence of ratio of inside /outer diameter on motion error

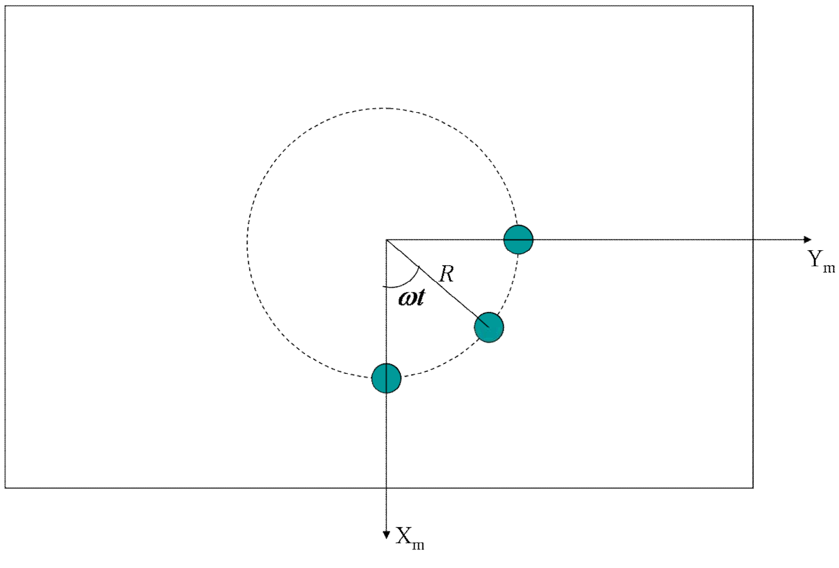


Fig.4.10 Model of rolling ball on X_m-Y_m plane

4. 3. 3　ボールの転がり運動の定常応答中の鉛直方向の運動

前章の 3.3.2 節定常応答に達してからのボールの Z_m 方向（鉛直方向）の運動

変位を実験的に考察した．本章では，その理論的な考察を遂行する．プレートが水平の状態を基準とし，転がり運動中のボールの高さ変化を Z_B とする．図 4.10 に示す様に，ボールがプレート上を転がり円運動(反時計回 CCW を正とする)する中心の角速度を ω とする．ここで，

$$Z_B = [R_c \cos\omega t]\sin\theta_x + [R_c \sin\omega t]\sin\theta_y \tag{4-9}$$

と考えられる．式(4-4)，(4-5)を式(4-9)に代入して，さらに θ_x および θ_y が十分に小さいことを考慮すると，

$$Z_B = R_c\theta_0 = \text{Constant} \tag{4-10}$$

となる．ボールの X_m-Y_m 平面上の位置 ${}^{m}Y_B(t)$, ${}^{m}X_B(t)$ はそれぞれプレートの Y_m 軸と X_m 軸まわり θ_x, θ_y と位相は一致する．よって

$$\begin{aligned} {}^{m}Y_B(t) &= R_c \sin\omega t \\ {}^{m}X_B(t) &= R_c \cos\omega t = R_c \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \tag{4-11}$$

になる関係になる．

本実験で使ったプレートは 600×450mm であることも考慮して，定常状態における円軌道の半径 R_c＝0.05m を狙いとして，最大傾斜角 θ_0＝3°，周期 T＝2.3s（角速度 ω=2.7rad/s）として，ボールの Z_m 方向の運動変位を確認した． その結果，

実験においても Z_m 方向の変位($=R_c\theta_0$)は変化しないことがわかった. またその時, ボールが常に円周軌道上でプレートを昇る傾斜方向に転がり運動していることも確認できた.

4. 3. 4　旋回制御のオフセット角度誤差の影響

本節では，プレートの X_m(Y_m)軸の旋回制御の角度にオフセット角度誤差がある場合について考える．図 4.11 は片方の旋回運動に誤差が存在する場合の二次元モデルである．このモデルは式(4-5)の代わりに，オフセット角度誤差 θ_1 を加えた式(4-12)として表現する．実際の実験では X_m 軸の時計まわりの制御角度を大きく指令し，ボールの転がり軌跡を観察した．実験とシミュレーションの結果を図 4.12 に示す．図 4.12(a)は θ_1=0.025°，図 4.12(b) は θ_1=0.12°の例である．図より，転がり運動軌跡の中心がプレート Y_m 軸の原点から移動することがわかる．図 4.12 (b)よりオフセット角度誤差 θ_1 の値が大きい場合，ボールの転がり軌跡は三角形おむすび形状（梨状）になることがわかる．さらに実験とシミュレーションの結果は良く一致しており，このような場合も式(4-3)～式(4-5)に基づくシミュレーションで十分な精度があることもわかった.

また 4.3.3 節で，オフセット角度誤差が存在しない時は転がり円運動中のボールの鉛直方向の運動変位は Z_B=Const であることを示した．ここで再び，鉛直方向の運動変位を考える.

$$\theta_x(t) = \theta_{x0}\sin[\omega t + \alpha] + \theta_1 \tag{4-12}$$

であるので，式(4-12)を式(4-9)に代入して

$$Z_B = R_c\theta_0 + R_c\theta_1 \cos\omega t \tag{4-13}$$

が得られる. 式(4-13)に基づいて, 図 4.12(a), (b)の条件で計算した. 結果を図 4.13 に示す．実験でも本結果と良好な一致がみられ，この場合は鉛直方向の運動変位は三角関数で変化することが確認できた.

次に，そのオフセット角度誤差 θ_1(θ_1＜θ_x)と転がり円軌道の中心移動の関係について考える．実験と計算結果を図 4.14 に示す．この場合も両者は良好な一致をしている．図 4.14(a)より，式(4-4)および(4-12)において基準角度（$\theta_y = \theta_x = 3°$）およびオフセット角度誤差が一定の場合，周期（角速度）が変わると，オフセット角度誤差に対して軌道の中心の移動量は線形的な関係を示す．転がり半径（R_c=0.01m）を一定に固定する場合，周期に対して軌道の中心の移動量は指数関数に増加することがわかる．図 4.14(b)より，周期を一定にして，オフセット角度誤差に対して中心は線形的に移動することがわかった.

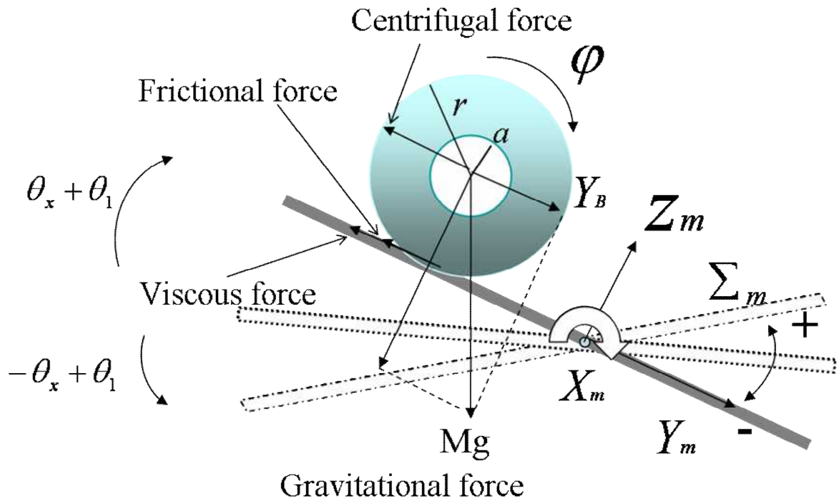
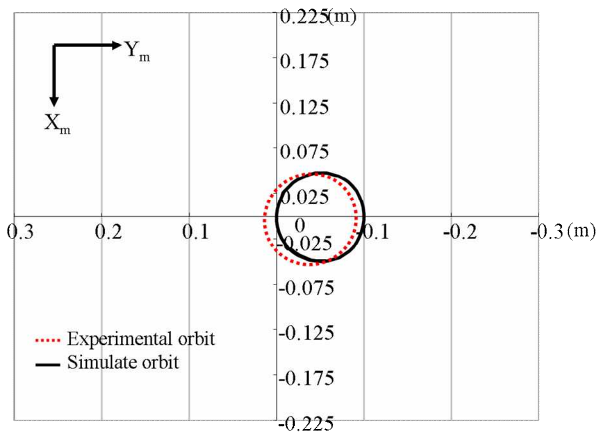
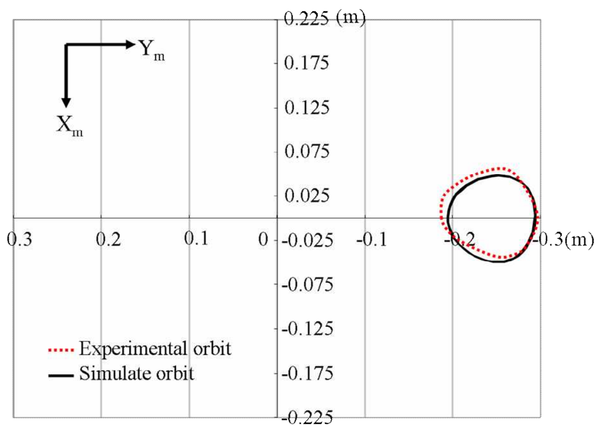


Fig.4.11 Model of ball rolling on working plate with offset angle error



(a) θ_1=0.025°



(b) θ_1=0.12°

Fig.4.12 Experiment and simulation results of rolling orbit

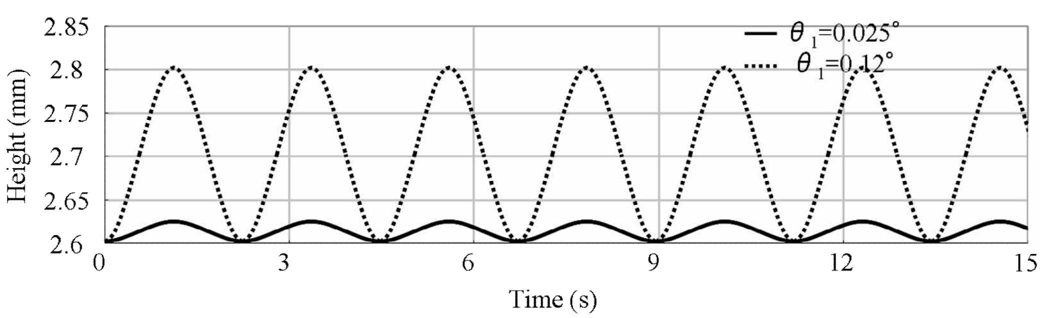
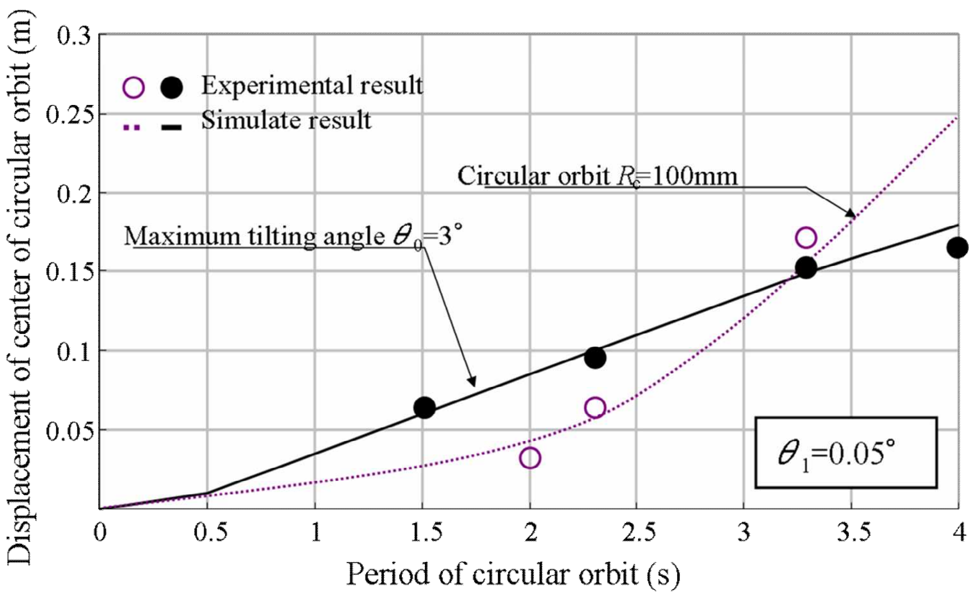
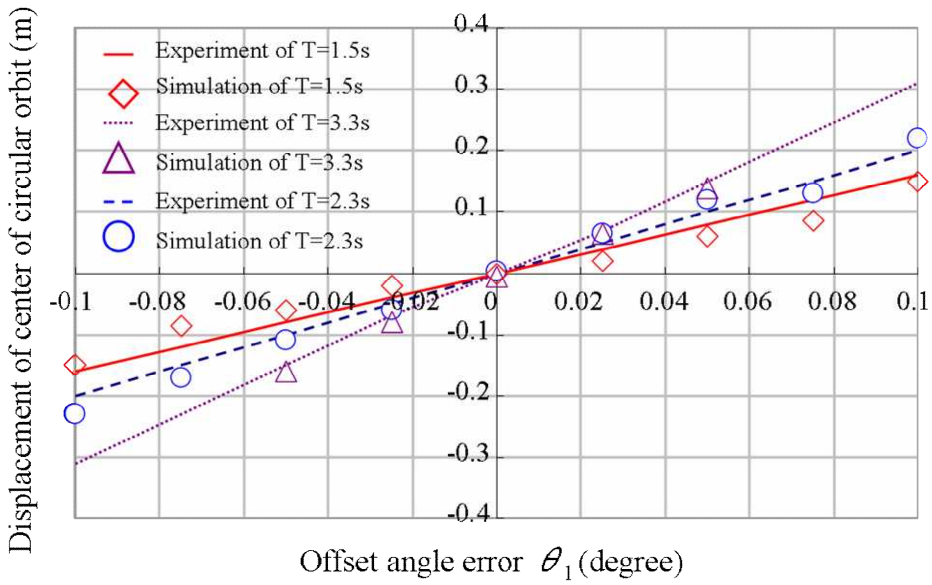


Fig.4.13 Height of ball when rolling motion at period T=2.3s



(a) Rolling period and center displacement



(b) Influence of off-set error on center displacement

Fig.4.14 Influence of period on rolling center of ball

4. 3. 5　制御角度と同期運動誤差が転がり軌跡に与える影響とその診断方法

ボールの転がり軌跡とシミュレーションで定まるその予想基準円からの差で同時 2 軸の旋回運動の特性を簡易的に診断する手法について考察する. 最初に，旋回軸の制御運動において最大角度にのみ誤差を有する場合｛式(4-5)において $\varepsilon \neq 1$，すなわち 2 軸間の最大角度の不一致が生じている場合｝を考える．図 4.3 の条件において，X_m 軸と Y_m 軸での傾き角度の最大値の差が 0.5°の例（θ_{y0}＝3.5°, θ_{x0}=3°, 周期 T=3.3s）を図 4.15 に示す．この場合，三種類のボールとも楕円軌跡になり楕円の長軸が Y_m 軸になることがわかる．図 4.7 で横軸 ω=1.9rad/s（周期 T=3.3s）に示されている通り，パチンコボール，中空マウスボール，中実マウスボールの順で運動軌跡の半径が大きく，その診断が容易であることがわかる.

次に 2 軸の旋回軸でドループの不一致が生じた場合を想定して，プレートの X_m 軸に対して Y_m 軸の運動の位相の差に誤差を与えた場合（指令 α＝90°はであるが，実際は α＝91°，95°で旋回運動した場合）について実験と計算を行った. 結果（傾斜角 θ_{y0}＝θ_{x0}＝3°，周期 T＝3.3s，半径 R_c＝0.1m）を図 4.16 に示す．このような場合，楕円の長軸が X_m 軸または Y_m 軸に対して傾くことがわかる．図 4.16 (a)より，位相の誤差が小さい場合（α＝91°），パチンコボールを用いた方が楕円の軸の傾きが顕著に観察できることがわかる．逆に図 4.16 (b)より，位相の誤差が大きく（α＝95°）なってもパチンコボールでは軸の傾きの角度にあまり差がみられないこともわかる.

以上をまとめ, 式(4-4), (4-5)におけるプレートの旋回 2 軸間の最大回転角度の比 ε と位相 α の誤差の影響を考察する．図 4.17，4.18 はシミュレーションと実験結果を示す．図 4.15 に示されるように，位相 α=90°で最大角度にのみ誤差が

生じて $\theta_{y0}\neq\theta_{x0}$（ε＜1）の場合，転がり軌道は楕円の長軸が X_m 軸に一致するものになる．そこで θ_{x0}＝3°に固定し，角度誤差 $\Delta\theta=\theta_{y0}-\theta_{x0}$，$\theta_{y0}+\theta_{x0}=6°$，即ち（1+ε）$\theta_{y0}$＝6°の二つの条件で，楕円軌道の長軸の長さ b と短軸の長さ a の差 Re=2(b-a) と角度誤差 $\Delta\theta$ の関係を調べた．結果を図 4.17 に示す．長軸と短軸の差 Re が角度の誤差 $\Delta\theta$ の増加により直線状に増加し, 角度誤差の条件が変わるとその直線の傾きが変化することがわかる．また用いるボールの種類に着目すると，同一の条件においてはパチンコボール，中空マウスボールの順に直線の傾きが大きく，検出感度が高いことがわかる．また図中で直線の傾きが最も小さな中実マウスボールの例を用いて撮影画素あたりの感度を算出すると，長軸または短軸に 1 画素分の軌跡変化が生じたとして，$\Delta\theta$=0.02°/画素なる十分な分解能を示していることもわかる．

一方，旋回運動における 2 軸間の旋回位置ドループの不一致などにより X_m 軸まわりと Y_m 軸まわりの位相ずれが 90°でない場合（ここで, 同期誤差 $\Delta\alpha=\alpha$-90° とする）のボールの運動軌跡は長軸の X_m 軸に対する傾斜角を β とすると，$\Delta\alpha$ と β の関係は図 4.18 のようになった．その楕円軌道の長軸の長さ b'と短軸の長さ a'の差 Re'=2(b'-a')として図に合わせて示してある．図 4.18(a)により，同期誤差 $\Delta\alpha$ の増加により β は指数関数的に増加することがわかった．しかしながら，応答性が高いパチンコボールでは $\Delta\alpha$ の値が 10°以上で，応答性が低い中実マウスボールでは $\Delta\alpha$ の値が 20°以上で β が 45°に収束することもわかった．したがって，パチンコボールは $\Delta\alpha$ の検出感度が高いが，検出できる角度 $\Delta\alpha$ が制限される一方，中実のマウスボールは，比較的大きな角度 $\Delta\alpha$ まで広範囲な検出ができることがわかった．図 4.18(b)により，斜め楕円の長軸と短軸の差 Re'は同期誤差 $\Delta\alpha$ の増加によりほぼ直線的に増加することもわかった．さらに図 4.17 と同様に，その長軸または短軸に 1 画素分の軌跡変化が生じたとして中実マウス

ボールの例で感度を算出すると，$\Delta\alpha$=0.5°/画素と十分な分解能を示していることがわかる．

式(4-4)，式(4-5)を基本として直交する 2 軸旋回の角度運動を三角関数で考え指令し，そのプレート上にボールが転がる運動の軌跡をモニターし，一方でその基準円を式(4-3)で算出して両者を比較することにより，簡易的にその運動誤差の診断と改善ができることがわかる．すなわち，最大角度誤差および同期誤差（位相差）および角度のオフセット誤差は，転がり軌跡の楕円の長軸と短軸の比およびそれらの X_m 軸または Y_m 軸となす角度，および中心の位置を調べることで診断が可能である．その時，半径が小さく減衰も小さなボールを用いると高い応答性で検出ができるが，誤差の検出できる範囲が狭くなる．逆に，半径が大きく減衰も大きなボールを用いると応答性が下がるが，広い範囲で汎用的なモニターができる．また中空のボールを用いると，同じ外径の中実ボールに対して応答性は改善される一方，直進運動による運動誤差の影響を受けやすくなることがわかった．

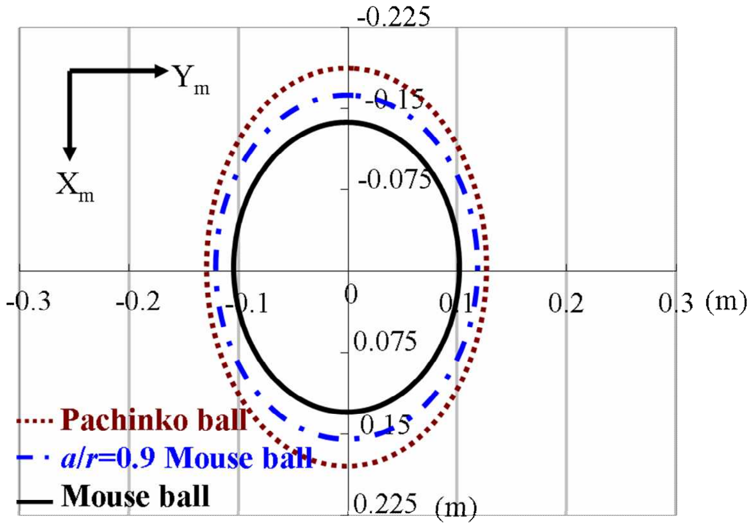
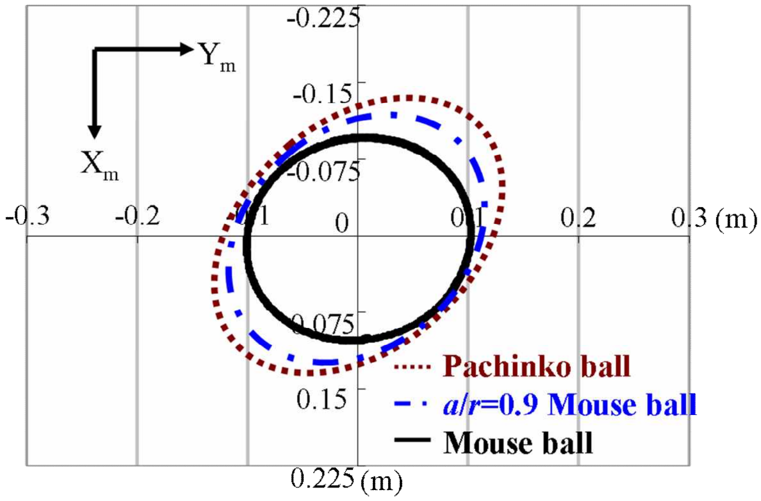
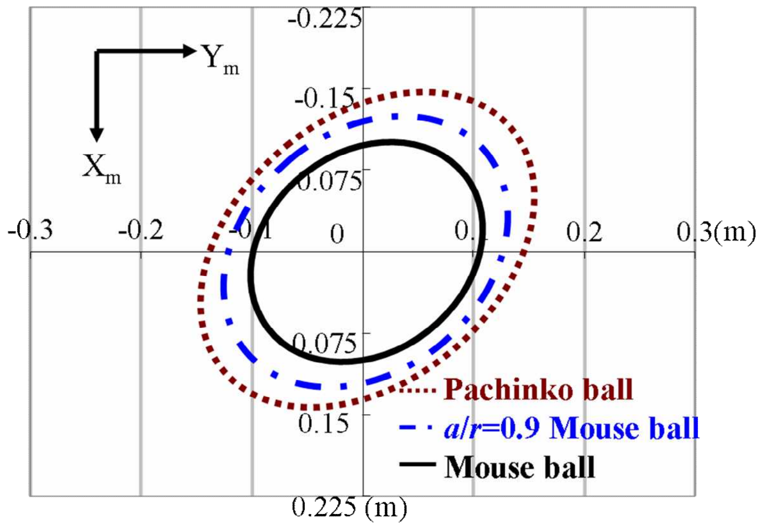


Fig.4.15 Rolling path with angle controlling error



(a) 91°difference



(b) 95°difference

Fig.4.16 Rolling path with phase controlling error (Phase difference α= 91°, 95°)

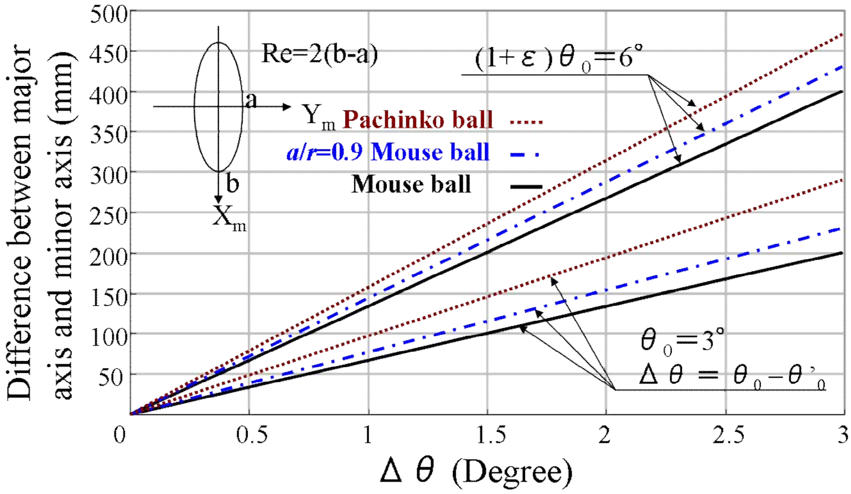
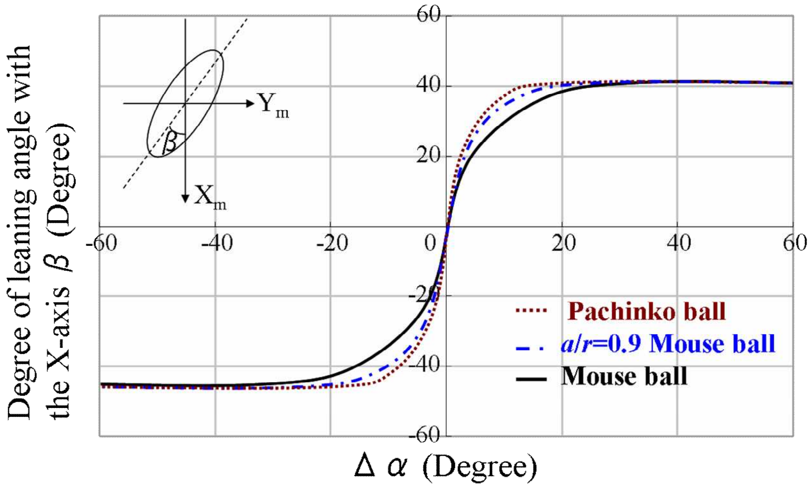
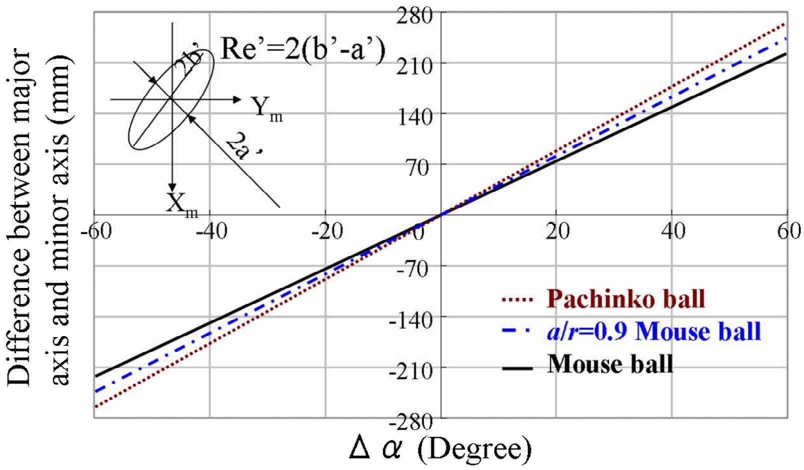


Fig. 4.17 Influence of angle controlling error on circular orbit



(a) Degree of leaning angle



(b) Difference between major and minor axis

Fig. 4.18 Influence of synchronous control angle on circular orbit

4.4　結　　　言

現場で簡易的に 2 軸同期の旋回運動の運動誤差を診断する方法として，作業プレート上に円軌道のボールの転がり運動を創成し，その転がり軌道の基準円に対する誤差を用いる新しい手法を提案している．本章では，使用するボールの種類の影響およびオフセット角度誤差について考察し，それらについて双腕ロボットを用いて検証を遂行した．その結果，以下の結論を得た．

(1)　高い周波数帯まで十分な応答特性を確保したい場合，外径が大きな中空ボールを選択すると良いことがわかった．ただし中空ボールに関しては，効果を期待するためには内外径比（=内径/外径）で0.8 程度以上を用いる必要があることもわかった．また，中空ボールは直進軸方向の運動誤差の影響も受けやすいため，そのような外乱が予想される場合には適さないこともわかった．

(2)　プレートの $X_m(Y_m)$軸の旋回制御の角度にオフセット角度誤差がある場合，転がり円軌跡の中心が移動することがわかった．したがって，最大角度誤差および同期誤差（位相差）および角度のオフセット誤差は，転がり軌跡の楕円の長軸と短軸の比およびそれらの X_m 軸または Y_m 軸となす角度，および中心の位置を調べることで診断が可能であることが示された．

(3)　半径が小さく減衰係数も小さなボールを用いれば，小さな運動誤差でも検出が可能になる一方で，検出できる誤差の範囲が狭い．逆に，外径が大きく減衰係数も大きなボールを用いれば，小さな運動誤差の検出感度は下がる一方で，検出できる誤差の範囲が広くなる．したがって，事前に式(4-3)～式(4-5)に基づいて予想される運動誤差を考慮して，適切に用いるボールを選定する必要があることもわかった．

第 5 章　転がり摩擦係数の影響および測定精度

5.1　緒　　　言

前章までの成果として，近年開発された多関節ロボットアームを各腕として構成された双腕ロボットに着目して，両腕で作業プレートを保持することで閉リンク構造を具現化でき，ある程度の支持剛性の確保が可能で，人の動作に近い範囲において作業用としても実用性があることを示した(32)．双腕ロボットの両腕で作業プレートを支持する手法では，自由度が比較的高く空間上でプレートに直進運動および旋回運動を与えることが可能である．そこで現場で簡易的に 2 軸同期の旋回運動の運動誤差を診断する方法として，作業プレート上に円軌道のボールの転がり運動を創成し，基準円に対する転がり運動誤差を用いる新しい手法を提案し，シミュレーションおよび実験の両面よりその有効性および実用性を確認した(35)．さらに転がり運動に用いるボールの慣性モーメントと運動誤差の検出感度の関係について解明し，必要とされるプレートの旋回運動に合わせた転がりボールの選定指針を示した．加えて 2 軸の旋回運動軸の中心が，ボールの転がり運動の中心と一致する場合と旋回軸の旋回運動にオフセット角度誤差が存在する場合についての特性も解明した(36)．

しかしながら，転がり運動に用いるボールの転がり摩擦係数の違い(ボールの密度, 直径, 表面状態の差)と検出感度の関係について十分に述べていなかった．そこで本章(40)では，ボールとプレート間の転がり摩擦係数を変化させた場合を取り上げ，その検出感度に与える影響を考察することで提案する手法の一般性を広げる．

5. 2　基本理論と実験方法

5. 2. 1　基本モデルと用いるボールの種類

前章で，中実ボールのみを考えた場合（第 3 章）(35)，中空ボールも含めて考えた場合（第 4 章）(36)を扱った．本章では，一般性の拡張を考慮して様々なボールを用いて実験とシミュレーションを行う．ボールの詳細を Table 5.1 と図 5.1 に示す．M22, M18 はマウス用の径の異なるボールで鋼製だが表面はゴムで摩擦係数を高めている．C13, 19, 22 は径の異なるセラミックス球(ボールベアリング用)で密度が鋼の約 1/2 である．P11 はパチンコ球で鋼製である．H42 は液体の熱や蒸発の損失を防ぐ中空精密球でポリプロピレン製で密度が鋼の約 1/9 である．また，D, D_M の値は第 4 章と同様にアクリル円筒面の転がり振り子実験による実測値を用いた．

Table 5.1 Specifications of ball

Ball	Mouse ball (M22)	Mouse ball (M18)	Ceramic ball (C13)	Ceramic ball (C19)	Ceramic ball (C22)	Pachinko ball (P11)	Hollow ball (H42)
Maker	ELECOM Co.,LTD	ELECOM Co.,LTD	IKEDA SANGYO Co.,LTD	IKEDA SANGYO Co.,LTD	IKEDA SANGYO Co.,LTD	SATO TEKKOU Co.,LTD	HUMANITY Co.,LTD
Mass [Kg]	0.032	0.016	0.004	0.014	0.022	0.005	0.002
Diameter [mm]	22	18	13	19	22	11	42 ($2a$=38m)
Density [g/cm^3]	7.87	7.87	3.9	3.9	3.9	7.184	0.855
D [N･s/Kg]	0.016	0.006	0.0005	0.001	0.001	0.0006	0.0003
D_M [N･s/m･Kg]	0.5	0.38	0.13	0.08	0.06	0.126	0.17
Inertia moment [Kg･m^2]	1.55×10^{-6}	0.5×10^{-6}	0.7×10^{-7}	0.5×10^{-6}	0.1×10^{-5}	0.6×10^{-7}	0.3×10^{-6}
Sphericity [μm]	±50	±50	±0.25	±0.4	±0.5	±20	±50

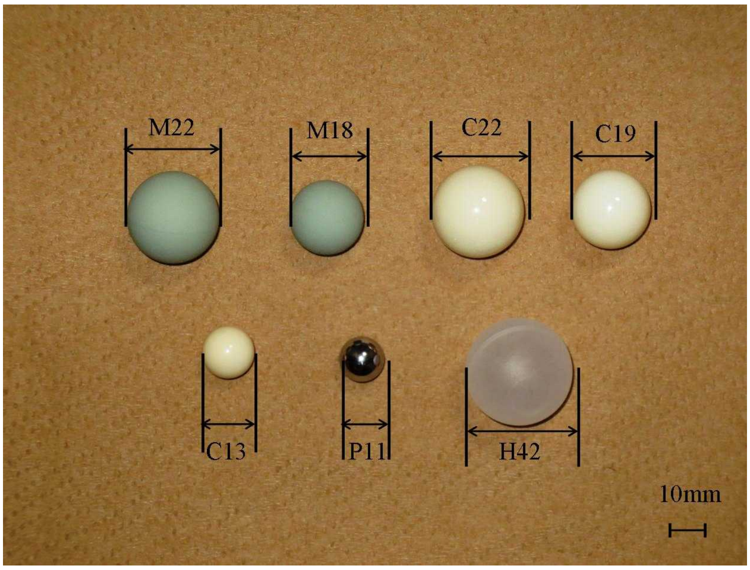


Fig.5.1 Balls used in experiment and simulation

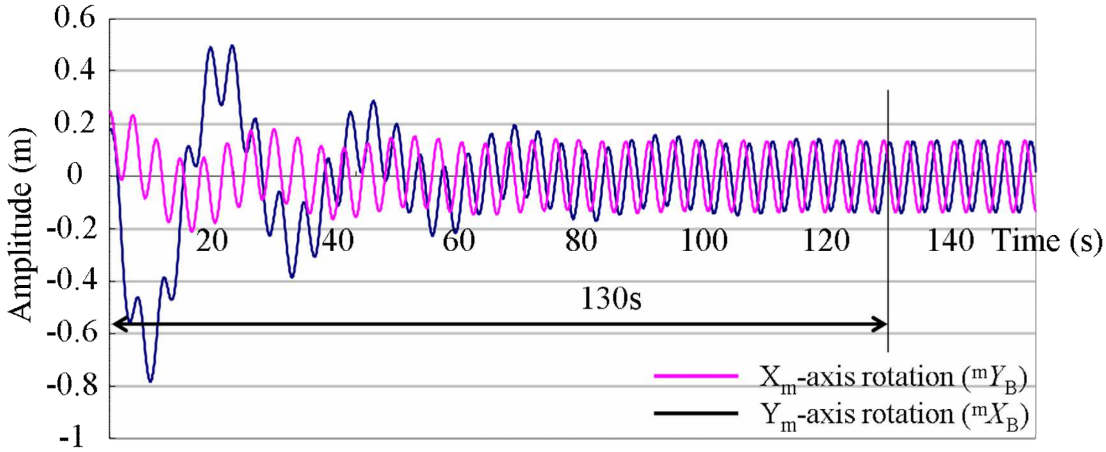
5. 3　解析および実験結果と考察

5. 3. 1　使用するボールの違いとボールの転がり円運動の過度および周波数応答

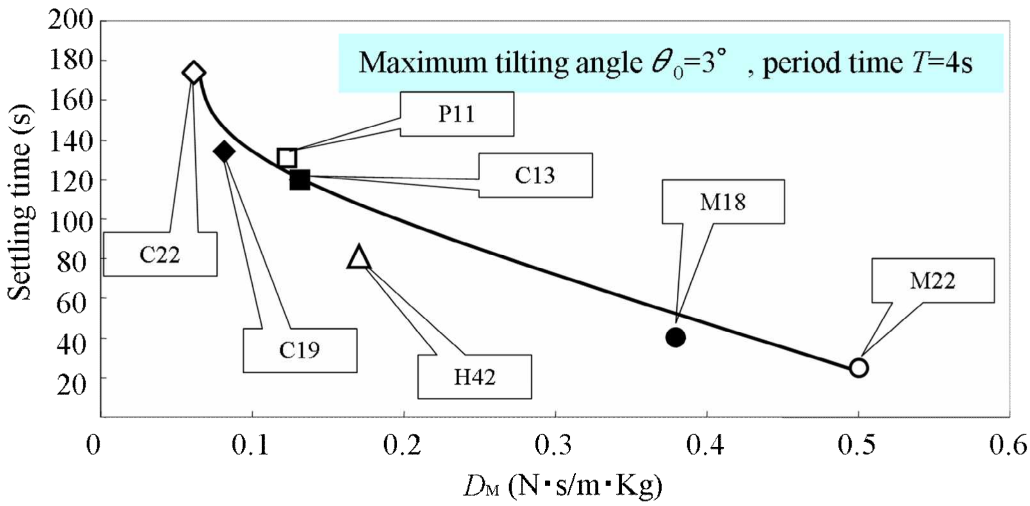
式(4-3)，(4-4)，(4-5)より中空，中実の密度，半径および表面状態が違うボールを用いた場合について，プレート上の転がり軌道計算を行い，定常応答時までの過度応答と周波数応答の特性を考察する．マウスボールを用いた転がり計算値と実験値の定常状態の比較結果[37]（最大傾斜角 θ_0＝3°，周期 T＝3.3s すなわち角速度 1.57rad/s，α＝90°，θ_{y0}＝θ_{x0} の例）は図 3.8 に示した．図 5.2(a)は，プレート上の ${}^{m}X_B$=-0.17m, ${}^{m}Y_B$=-0.25m にボールを置き，その位置を初期位置として図 2.1(b)に示す X_m 軸まわりおよび Y_m 軸まわりの同期運動（最大傾斜角 θ_0＝3°，周期 T＝4s すなわち角速度 1.57rad/s，α＝90°，θ_{y0}＝θ_{x0} の例）をプレートに与えた

時のボールの運動の位置成分である．図 5.2(a)は C13 の計算例であり，定常応答に達するまでの整定時間(10%)は 130s 程度になることがわかる．図 5.2(b)には，各ボールのプレート上の転がり運動が定常応答(転がり円運動)になるまでの整定時間をと D_M の関係を示す．結果より，ボールの密度，慣性モーメント，表面状態を変化させた場合においても整定時間は D_{M} の値の影響が大きいことがわかる．

式(4-7)より，ボールの駆動力 F'_{Ball} を入力，ボールがプレート上の各軸上で定常応答の振動運動する片振幅（転がり円運動の半径 R_{c}）を出力とした伝達関数のボード線図（ゲインの単位は m/N）を考え，その計算結果を図 5.3 に示す．図 5.3 より，プレートの旋回運動の角速度とボールがプレート上を回転する出力転がり半径と位相の周波数応答がわかる．図 5.3(a)より，D_M が小さいと共振現象が起こり不安定な周波数帯が存在することがわかる．図 5.3 (b)より，位相が-90°を示す周波数を調べると，用いるボールが軽量(直径が小さい，中空である，密度が小さい)であるほどその周波数をあげることができることがわかる．一方，D_{M} が十分に大きな値を示す M22 は共振現象もなく全周波数帯で安定した計測が可能であることもわかる．D_{M} が十分に大きな値を確保できない場合，用いるボールの径を小さくすると，密度の小さな材質にすることで共振の周波数をあげる手法が有効であることがわかる．また C13 に着目すると共振周波数は 2Hz 程度である．一方で図 5.2(a)における定常応答までの振動の周波数は 0.05Hz 程度である．両者に大きな差が見られ，系の非線形系が強いこともわかる．

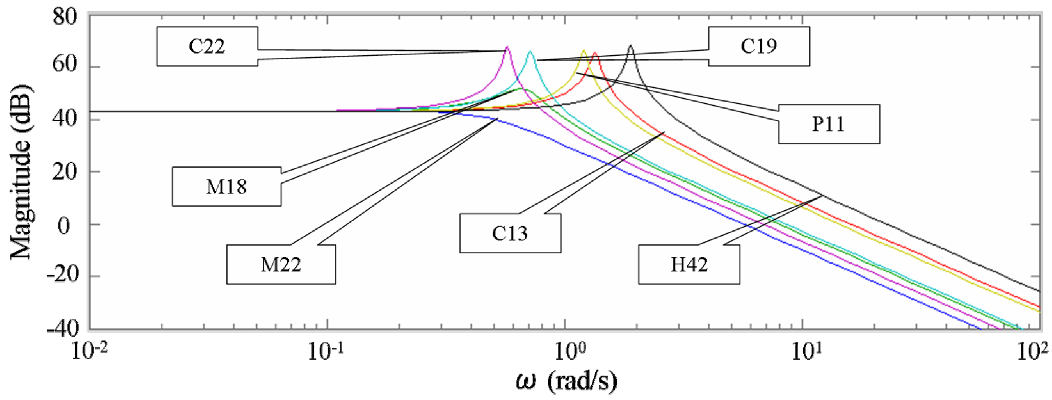


(a) C13 ball, $\theta_0 = 3°$, $T = 4$s

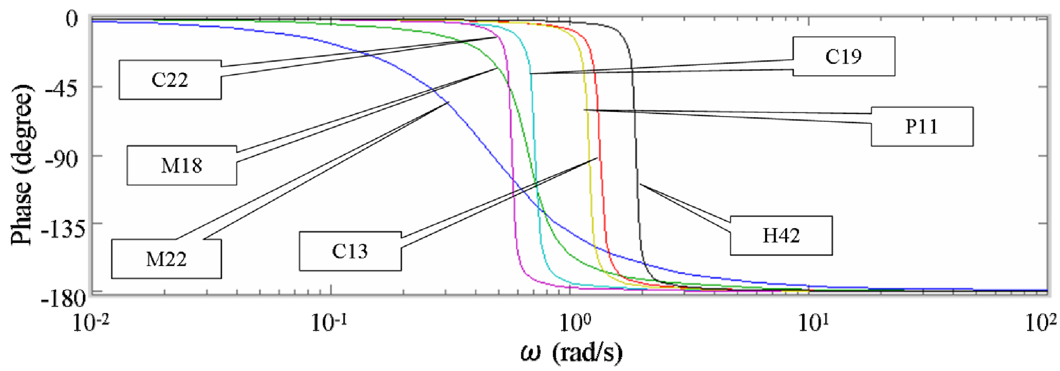


(b) Influence of used ball

Fig.5.2 Settling time



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig.5.3 Bode diagram of ball rolling motion on working plate

5. 3. 2　ボールの転がり半径と運動誤差の関係

高精度なジャイロセンサーなどが搭載できないコンパクトロボットによる小面積のプレートの操り動作などへの応用を考える．この場合，応答性が高く小さいボールによる半径の小さい円軌道で計測する必要があると考えられる．図 5.4 はマウスボール M22(θ_0＝3°, T＝1.5s, R_c=0.05m)の定常状態になった計算結果である． D_M が変化する場合の表 5.1 の種々ボールを用い，転がり最大誤差/転がり半径を調べた結果を図 5.5 に示す．ここで基準円はマウスボール(M22, θ_0＝

3°，T＝3.3s)の計算値(R_c=0.1m)として，最大誤差はボールの転がり実軌跡と基準円の差の最大値である．共振現象に注意する必要があるが，転がり半径が小さくても十分な誤差を生じさせるためには密度の小さなセラミックスボール(C22, C19, C13)などが有効な手段になることがわかる．

5. 3. 3　転がり摩擦理論と D_M の関係

図 5.2(b)や図 5.5 などにおいて，D_M の値が重要であることがわかる．そこで本節では D_M に関係が深い転がり摩擦係数について考える．半径 r のボールが平面上を平面に平行な力 F を受けて転がる場合を考える．すべることなく転がり始めるためには，一定の回転モーメントを働かす必要がある．図 5.6 において示すように，ボールも水平面も弾性体であるので両方とも変形し，一部盛り上がるその点を A とする．ボールの中心を通る鉛直線から A 点までの距離を e とする．またボールの中心を通る水平線から A 点までの高さの差を r_R とすると，転がり始める時の A 点のまわりのモーメントのつりあいより

$$Mge = Fr_R \tag{5-1}$$

実際には $r_\mathrm{R} \fallingdotseq r$ なので式(5-1)は

$$F = \mu_r Mg \tag{5-2}$$

になる．ここで，$\mu_\mathrm{r}= e/r$ で，その μ_r は転がり摩擦係数である[38] [39]．その e は非常に小さい値なので，測定するのは難しいのが現状である．転がり摩擦は，おもに弾性ヒステリシス損失や微小滑りなどにより生じると言われるが，その値

が小さいため，いろいろな因子の影響を受けやすい．それで，普遍性のある法則を得ることは難しいが，上記とほぼ同じ意味の式[(41)~(43)],

$$\mu_r = kP^m / d^n \tag{5-3}$$

という形(d=2r)でも表現できる．ここで，指数 m, n については，諸説があるが，m は軟質金属で 1 に近い値を取る場合を除き零と考えてよいとされて，n は 0.4～1.7 程度の数値が実験的に報告[(41)~(43)]されている. したがって, 基本的に式(5-3)よりボール半径 r は大きい方が転がり摩擦係数が小さいことがわかる. 図 5.2(b)や図 5.5 などにおいて，C22, C19, C13, P11 に着目すると，密度の影響も多少あるが，ボールの半径の影響が大きいことがわかる．すなわち，D_M の変化は転がり摩擦係数の一般論とも一致していることがわかる．

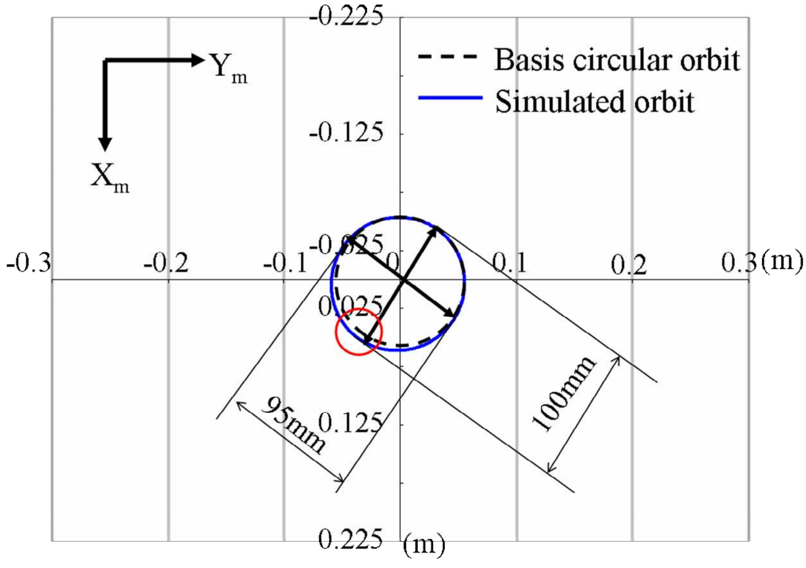


Fig.5.4 Rolling path of simulation result
(θ_0＝3°,　T＝1.5s, R_c=0.05m)

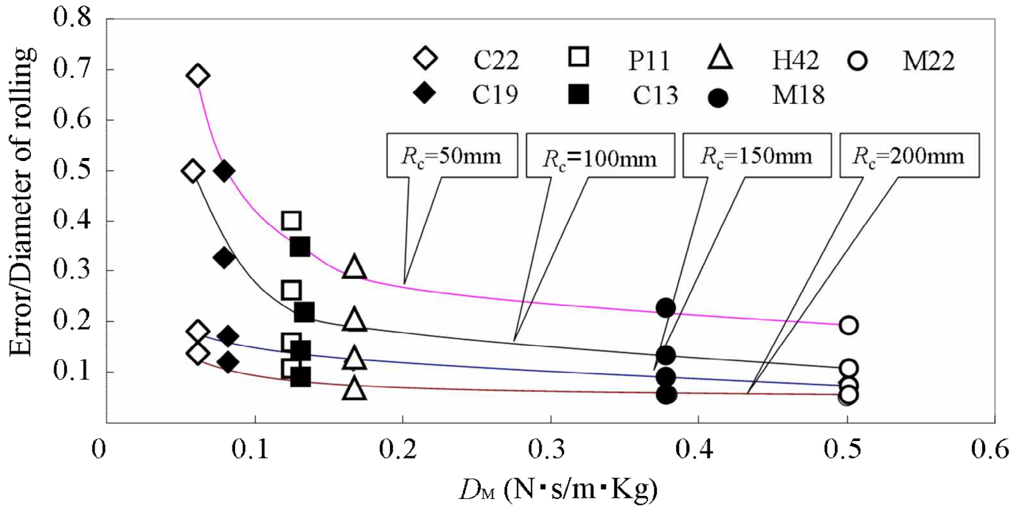


Fig.5.5 Influence of diameter of rolling orbit on maximum rolling error

(θ_0＝3°, T＝1.5～4.8s)

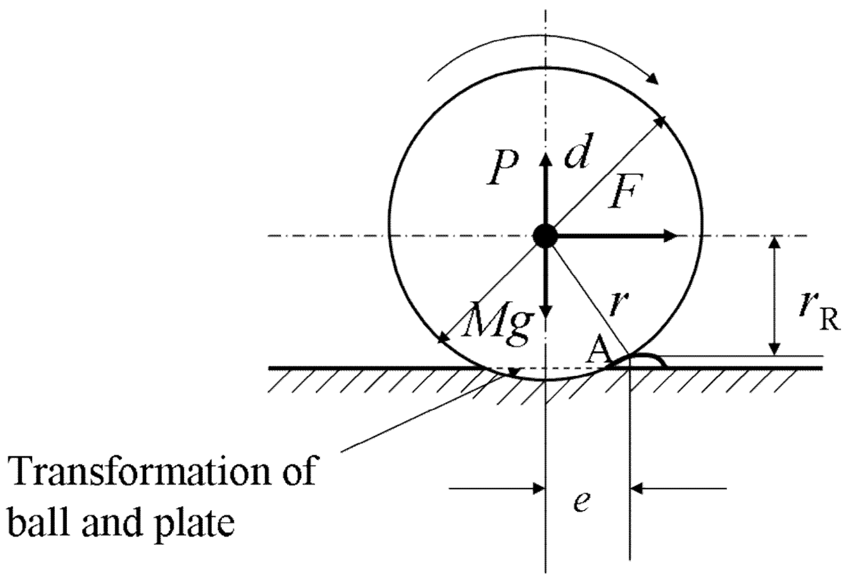


Fig.5.6 Rolling friction model of ball

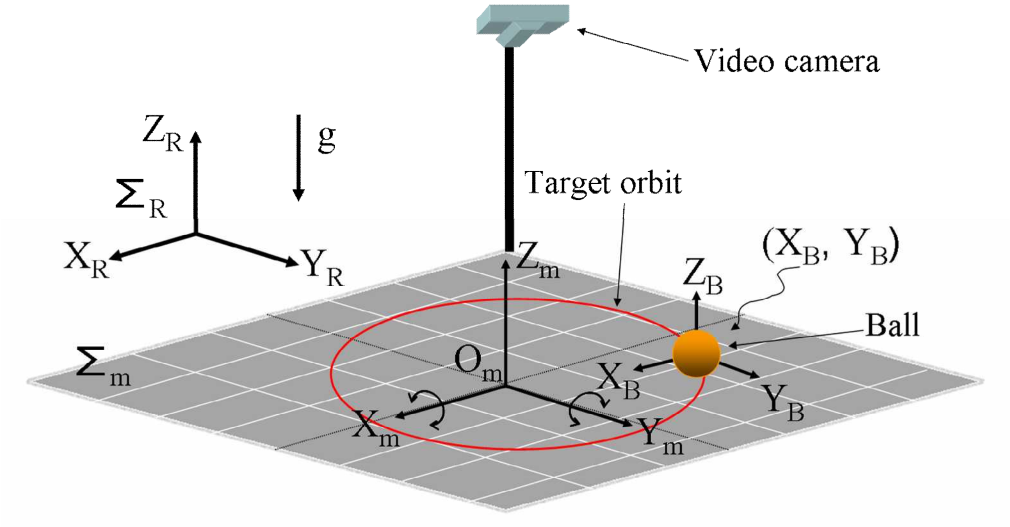


Fig.5.7 Three-dimension model of observing ball rolling on the working plate with video camera

5. 3. 4　ボールの種類と測定精度について

本節では，前述の提案した手法の画像測定の精度を考える．転がり円運動の 1 周の中で何枚の画像が撮影できるかは，フレームレート fps に依存する．図 3.8 などに示される様に，回転運動の誤差が生じるとボールの転がり軌跡は楕円となる．その定義には最小で 8 枚程度/周の画像があればよいと考えられる．本章の場合，周期 T=1.5～3.3s を対象にし，30fps で 45 枚～99 枚/周で十分である．

次に Z_m 方向の影響について考える．カメラの台座の支えを床に固定すれば，原理的には Z_m 方向のボールの上下変位も測定可能になる．しかし，Z_m 方向の分解能は低いことが予想される．Z_m 方向の測定範囲は，カメラの光学系の焦点深度に依存することになる．また，X_m-Y_m 平面の画像の結果はテーブル角度の補正が必要になり，X_m-Y_m 平面の測定精度も悪くなる可能性があると考えられる．一方，本手法で用いた様にカメラの台座を旋回運動するテーブルに固定すれば，Z_m 方向のボールの上下変位は測定できないが，フォーカスのずれもなく，X_m-Y_m

平面の画像はテーブル角度の補正も必要なく，高い精度で平面上のボールの転がり運動の評価が可能になる．したがって，本研究では 2.2.1 で述べた様に一貫してカメラの台座をテーブルに固定する手法を用いている．

最後に，最も重要と考えられる平面方向の空間分解能について考える．一般にボールがプレート上を転がる軌跡のプレート上の座標を図 5.7 に示す．プレートの制御角度誤差 $\Delta\theta_0(\varepsilon\neq1)$と同期誤差 $\Delta\alpha$ が存在する場合について考えると式(4-5)は

$$\begin{aligned}\theta_x(t) &= (\theta_{x0}+\Delta\theta_{x0})\sin[\omega t+\alpha+\Delta\alpha] \\ &= \varepsilon\theta_{y0}\sin[\omega t+\alpha+\Delta\alpha],(0<\varepsilon)\end{aligned} \tag{5-4}$$

になる．ここで簡単にするため図 5.8(a)を参考して，$\varepsilon\neq1$，α=90°($\Delta\alpha$=0)の場合について考えて，$\Delta\theta_0$ は微小，$\Delta\theta_0$ に対して軌跡の最大変化量 δ は線形とすると式(4-4)と式(5-4)より

$$\frac{\theta_0}{\theta_0+\Delta\theta_0}=\frac{R_c}{R_c+\delta} \tag{5-5}$$

が得られる．ここで R_c は ε=1，α=90°の時の基準円半径で，δ は画素 1 辺の長さである．式(5-5)を変形すると

$$\Delta\theta_0=\frac{\delta}{R_c}\theta_0 \tag{5-6}$$

になる．したがって，角度誤差 $\Delta\theta_0$ は式(5-6)画素の最小分解能 δ と関係づけら

れる．

次に，式(5-4)の ε=1，$\alpha\neq 90°(\Delta\alpha\neq 0)$ の場合について考える．この場合，長軸の傾きが X_m 軸に対して β=45°となる楕円軌道となる．ここで楕円の長軸/2 を R_1，短軸/2 を R_2 とすると，

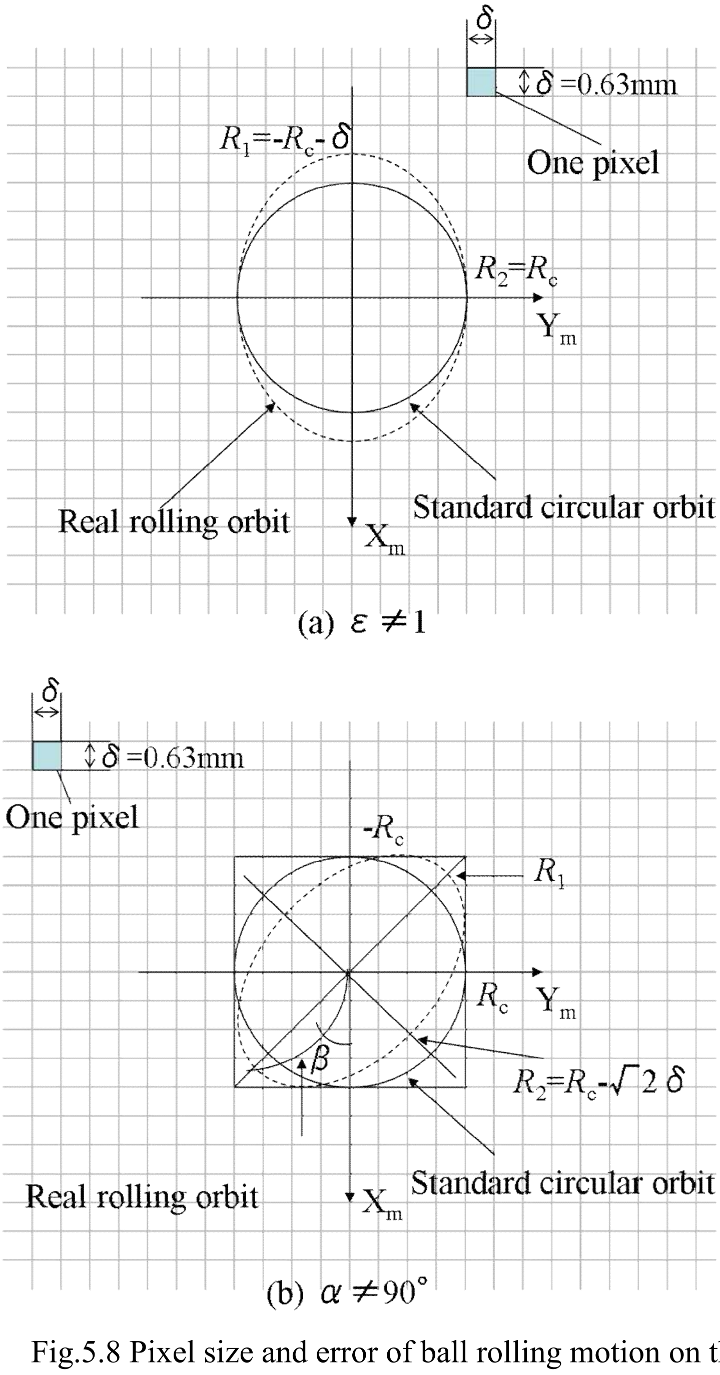


Fig.5.8 Pixel size and error of ball rolling motion on the working plate in image processing

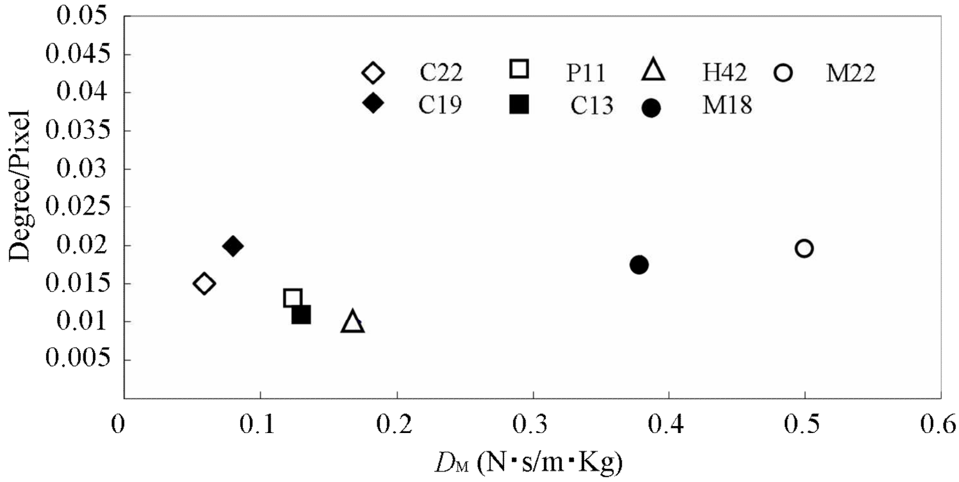
その短軸と長軸の比は $R_2/R_1=\Delta\eta/2$ と表される．ここで，$\Delta\eta$ は実際ボールがプレート上に転がる X_m 軸と Y_m 軸まわりの位相差(≠90°)である. したがって, 図 5.8(b)より R_1 と R_2 の変化範囲はそれぞれ $R_c \leqq R_1 \leqq \sqrt{2}R_c$，$0 \leqq R_2 \leqq R_c$ になり，同期誤差に対して長軸 R_1 の変化が小さく，R_2 の変化が大きいことがわかる．そこで R_2 の変化に着目して考えると，図 5.8(b)の楕円の長軸と短軸の関係は

$$\Delta\alpha = \alpha - \Delta\eta = \alpha - 2\tan^{-1}\frac{b-\sqrt{2}\delta}{b} \tag{5-7}$$

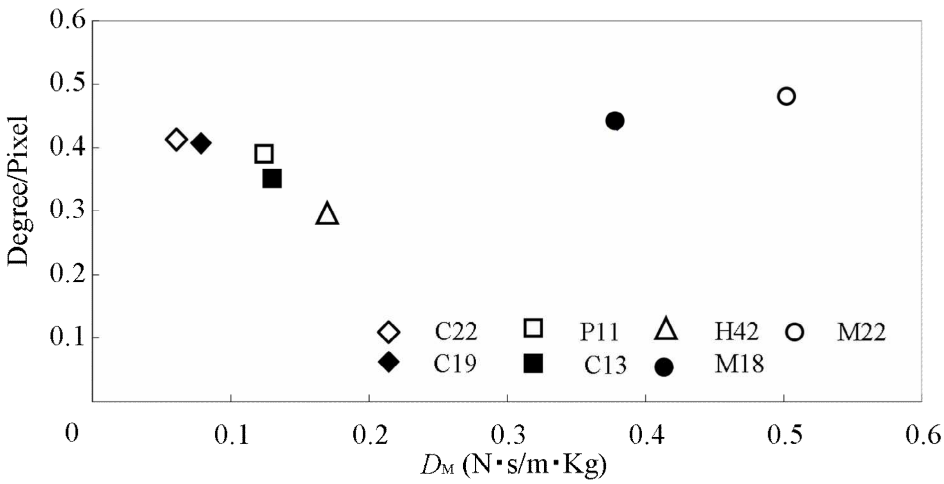
となる．したがって，楕円の短軸の長さの変化に着目することによって，同期誤差 $\Delta\alpha$ は式(5-7)画素の最小分解能 δ と関係づけられる.

2 章で示した様に，本手法では，カメラの画像の画素 δ は 0.63mm である．式(4-5)で $\varepsilon \neq 1$ の場合には図 5.8(a)の転がり軌跡，$\alpha \neq 90°$の場合には図 5.8(b)の転がり軌跡を評価することになる. ここで, 式(4-3), (4-4), (4-5)において $\varepsilon=1$ および $\alpha=90°$ を基準にした運動誤差を考える．表 1 の種々のボールを用いた場合の図 5.2 の条件における各ボールでの測定感度の計算結果を図 5.9 に示す．図 5.9 より，各ボールともプレートの傾斜角度 θ (=3°)の誤差に対する測定感度は同期精度 α の誤差の 10 倍以上高いことがわかる．また，半径が大きい中空ボール(H42)の測定感度は高く，転がり摩擦係数が大きいゴムをコートしたマウスボール(M22)の運動は安定しているが感度は低いことがわかる．しかしながらその場合でも，傾斜角度の誤差で 0.02°/画素以上，同期誤差では応答性の高い短軸の変化で考えると 0.5°/画素以上の検出感度があり，一般的な産業用ロボットの運動精度を考えると十分であることもわかる．さらに，図 3.8 において，マウスボール（M22）の最大転がり誤差は 10mm 程度である．したがって，カメラ画素 0.63mm に対し

ては十分な分解能を有していることがわかる.



(a) Sensitivity for ε



(b) Sensitivity for α

Fig. 5.9 Sensitivity of different ball on working plate

5. 4　結　　　言

前章では，現場で簡易的に 2 軸同期の旋回運動の運動誤差を診断する方法として，作業プレート上に円軌道のボールの転がり運動を創成し，その転がり軌道の基準円に対する誤差を用いる新しい手法を提案している．本章では，使用するボールの摩擦係数の違いの影響および提案する手法の運動誤差の計測感度について検討を加えた．その結果，以下の結論を得た．

(1)　コンパクトロボットによる小面積のプレートの操り動作などへの応用を考える場合，共振現象などの不安定運動に注意する必要があるが，転がり半径が小さくても十分な誤差を出すために密度の低い小さなセラミックスボールなどの使用が有効な手段になる．

(2)　提案する手法は動画からの画像解析に基づいており，その画素のサイズと運動の角度誤差や同期誤差の検出感度の関係を検討した．その結果からも，双腕ロボットにプレート支持をして 2 軸同期の旋回運動を行った場合に生じる運動誤差に対して十分な検出感度を有しており，現場的にも有効な手法であることが示された．

第 6 章　フィードフォワード補正によるロボットの種々姿勢の運動精度の改善

6.1　緒　　　言

前章までの成果を考慮して，双腕ロボットにおけるその技術の応用について考える．最近，双腕ロボットを用いた柔軟な薄板の板金作業における把持持ち替え動作[44]，さらに柔軟な風呂敷包みの把持持ち替え動作[45]などの作業分野でその工業的な有用性が示されてきている．これらは柔軟な物体の把持動作に基づく応用例と考えられる．一方，人間が作業現場で物体を操る場合を考えてみると，必ずしも物体を把持して行う動作ばかりではない．対象物を環境と接触させながら，重力や摩擦力を利用して操る（物体を押す，転がす）ことで，小さな負荷で作業を遂行できる場合も多い[46]．これらの作業をグラスプレス(grasp-less)マニュピュレーションと呼び, 物体を直接把持して作業を行うピックアンドプレイス型の操りに比較して，実行時間・消費エネルギー等の観点からも有利な場合が多いことが知られている[47]．工業的には比較的短い距離のパーツフィーダ，搬送中の外観の傷を嫌う部品や食品などの搬送に有効な手段になる[26]．しかしながら，近年の産業用双腕ロボットの運動精度の特長を生かしたグラスプレスマニュピュレーションに関係する研究報告はほとんどなされていないようである．

そこでグラスプレスマニュピュレーションの中でも，プレートの傾き角の制御で重力を利用して物体の操りを行う場合に着目すると，種々のロボットの姿勢における平面プレート上で球体を操る動作は難しく[48]，プロトタイプの直交する 2 旋回テーブルで遂行された例[49]，6 自由度の 1 台の多関節ロボットで遂

行された例[50]があるが，どの場合も産業用として十分な球体の転がり運動精度を具現化していないようである．

一方で生産現場において，CNC 工作機械における工具の直進運動の指令は直線補間運動 (G01) および円弧補間運動(G02,G03) が基本である．すなわち，それらを微小線分で組み合わせてプログラミングすることで位置に関する任意の運動が具現化できるからである．また円弧補間運動指令を利用して，円弧補間運動中の半径誤差を計測するダブルボールバー (DBB) 法（ボールバーの伸縮のモニタ情報）により，制御系の周波数応答，軸間の直角度誤差，サーボモータ回転運動反転時のバックラッシュ誤差，軸間のループゲインの不一致などが診断でき，運動精度の改善に有効であることが知られている[7]．そこで前章までの成果として，平面プレート上での球体の操り動作においてプレート上を球体が転がり円運動する場合に着目し，その転がり円運動の半径誤差からプレートの 2 軸旋回運動の動的な運動精度の診断が可能であることを示した[12]．またマニュピュレーションの対象となる球の違い（慣性モーメント，密度など）によるその特性の差についても解明した[36]．しかしながら，それらはすべて同一の基本姿勢のままでの評価であり，実際の現場での応用が開始された場合は様々な作業プレート保持姿勢での操り動作が想定されるが，その考察には至っていなかった．

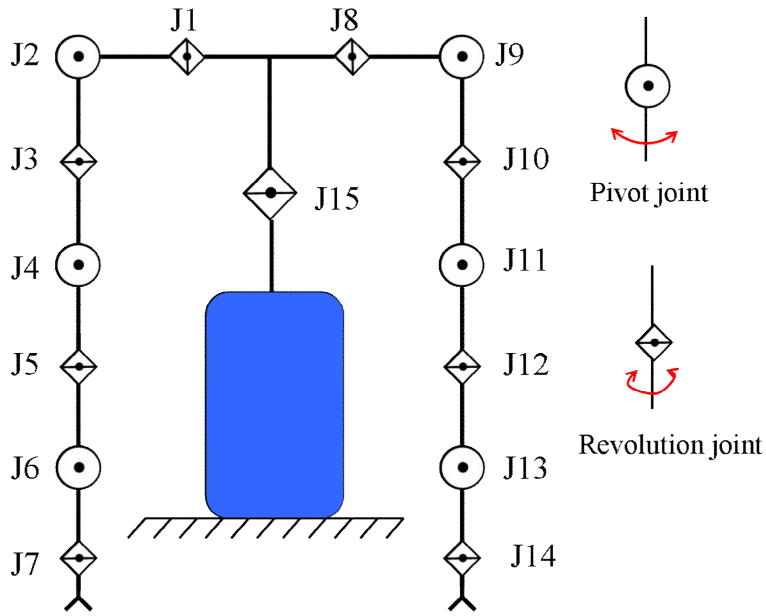
そこで本章[52] [53]では，産業用双腕ロボットの正面に作業プレートを保持する姿勢の中で，プレートの基本高さは一定にしたまま水平方向に保持位置を変化させてボールの転がり運動を操る場合について調べる．特に，工場現場で産業用ロボットに用いられている Point to Point 指令（ティーチング・プレイバック方式による作業指令）をベースにして指令角度を三角波で与えた場合についてのプレートの旋回運動の誤差を考察して，双腕ロボットによる支持の特徴に起

因する現象を解明する．さらに誤差要因の DBB 診断に基づき，現場で容易に補正するための方法を検討する．

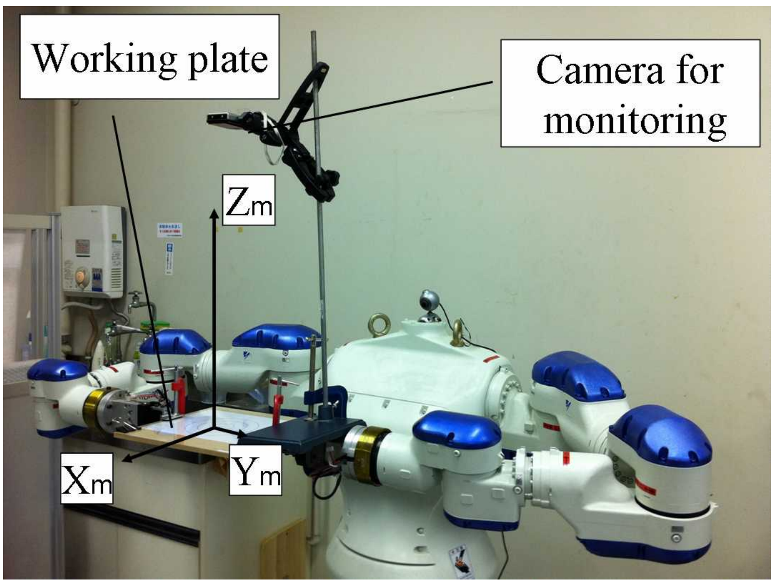
6. 2　基本理論と実験方法

6. 2. 1　基本モデル

ロボットのモデルは図 6-1(a)に示す．そこで図 6-2(b) に示す座標系を設定して，作業プレートを双腕で左右非対称支持しながら操り，その X_m 軸・Y_m 軸まわりで作業プレートに旋回運動を与えた（X_m 軸まわりの運動は腕のシリアル機構 J1～J6・J8～J13 の左右腕逆位相の上下動作に基づく旋回運動となり，Y_m 軸まわりの運動は手首 J7・J14 の単純な同位相旋回運動で，特性の異なる旋回運動の動作の同期精度の問題を扱うことになる）．プレートの支持には平爪を用い，上下からクランプしている． また実験で使用するプレートは平面サイズ 600×450mm（大型プレート/前章まで使用），300×300mm（中型プレート），200×200mm（小型プレート）の 3 種類を準備した．図 6.1(b)は中型プレートを保持した時の例である．



(a) Definition of Ji



(b) Definition of coordinate

Fig.6.1 Dual-arm robot

6. 2. 2　双腕ロボットの運動誤差評価の考え方

この節では，DBB 法の基本原理とその応用による双腕ロボット両腕の運動精度について考える．プレートに対する指令角度を $P(\theta_x, \theta_y)$ ，実際に動いた角度を $P'(\theta'_x, \theta'_y)$ とすると，構造的な静的誤差やサーボ系の動特性により実際の運動は以下の式のようになる．

$$\theta'_y(t) = G_y\theta_{y0}\sin(\omega t - \alpha_y) \tag{6-1}$$

$$\theta'_x(t) = G_x\theta_{x0}\cos(\omega t - \alpha_x) \tag{6-2}$$

ここで，G_y，G_x はサーボ系のゲイン，α_y，α_x は位相遅れでそれぞれ ω の関数である．

DBB 法で直交 2 軸の直進運動の運動精度を測定する場合，機械に円運動をさせて指令円半径からの差より評価する．その場合，直交 2 軸の旋回運動に適用すると上式中の最大傾斜角は $\theta_0=\theta_{x0}=\theta_{y0}$ となる．また，位相遅れ α_y，α_x は一般にはそれほど大きくなく，$\cos\alpha_y = \cos\alpha_x \fallingdotseq 1$，$\sin\alpha_y \fallingdotseq \alpha_y$，$\sin\alpha_x \fallingdotseq \alpha_x$ と近似できる．以上の条件で式(6-1)，(6-2)を変形し，位相遅れの 2 次以上の項をすべて無視すると，極座標形式 $P'(r', \tau)$で表すと次式のようになる．

$$r' = \theta_0\sqrt{\left\{G_x^2 + \left(G_y^2 - G_x^2\right)\sin^2\tau\right\} + \left\{\left(G_x^2\alpha_x - G_y^2\alpha_y\right)\sin 2\tau\right\}} \tag{6-3}$$

$$\tau = \omega t \tag{6-4}$$

今，機械が指令通りに運動すれば $r'=\theta_0$ となるので，その差よりサーボ系の動特性（ゲイン，位相遅れ）等を上式より評価することができる．DBB 法では，この原理を利用して工作機械の直進直交 2 軸の運動精度を評価している．本章では，この DBB 法の手法を上式により旋回直交 2 軸の運動に θ_x-θ_y 線図として応用し，双腕ロボットの両腕の運動精度を評価する．また，ボールの転がり円運動もサーボ系の動特性の影響を受け, 2 章で述べたように運動予想円からずれた運動を行うためサーボ系の動特性の評価にも利用できる.

6. 2. 3　作業プレートの最大および最小サイズと支持姿勢

本章では，双腕ロボットで操るプレートの大きさや配置（ロボットの姿勢）の影響を評価するが，実験条件を決定するうえでプレートの大きさと操作可能範囲の関係を知る必要がある.

図 6.2 に双腕ロボットによるプレート支持姿勢の寸法定義を示す（ロボットのプレート把持姿勢に関係する関節以外は省略している）．大型プレートを胸部の前に保持した姿勢（図 6.2）を標準姿勢とする．ここでは，検討を容易にするため図 3 中の J2，J6 と J9，J13 で構成される α_1，α_2，α_3，α_4 を図の様に定義し，その可動範囲を 0°～90°として検討する．したがって，操作できるプレートの大きさはロボットの各リンクの長さと関節の可動範囲によって決定される．プレートの a_2 辺と Y_m 軸が平行を維持する場合を扱うことにする．また，プレートの操りでプレートの最大傾斜角は 3°と小さいため，水平面中だけ考える．また，プレートの把持点 c1，c2 はプレート a_1 辺の中央とする．ここで，プレートを Y_m 軸に平行に旋回操作するためには L_1 と L_4，L_5 と L_8 が Y_m 軸と平行である必要がある．そこで，プレートがロボットの胴体と当たらないための条件は次式で与

えられる．

$$L_2 \cos\alpha_1 + L_3 \cos\alpha_2 - L_0 \geq \frac{a_1}{2} \geq 0 \tag{6-5}$$

また，プレート把持点 c1，c2 の距離が a_2 であるための条件は次式で与えられる．

$$(L + L_5 + L_6 \sin\alpha_3 - L_7 \sin\alpha_4 - L_8) + (L_1 + L_2 \sin\alpha_1 - L_3 \sin\alpha_2 - L_4) = a_2 \tag{6-6}$$

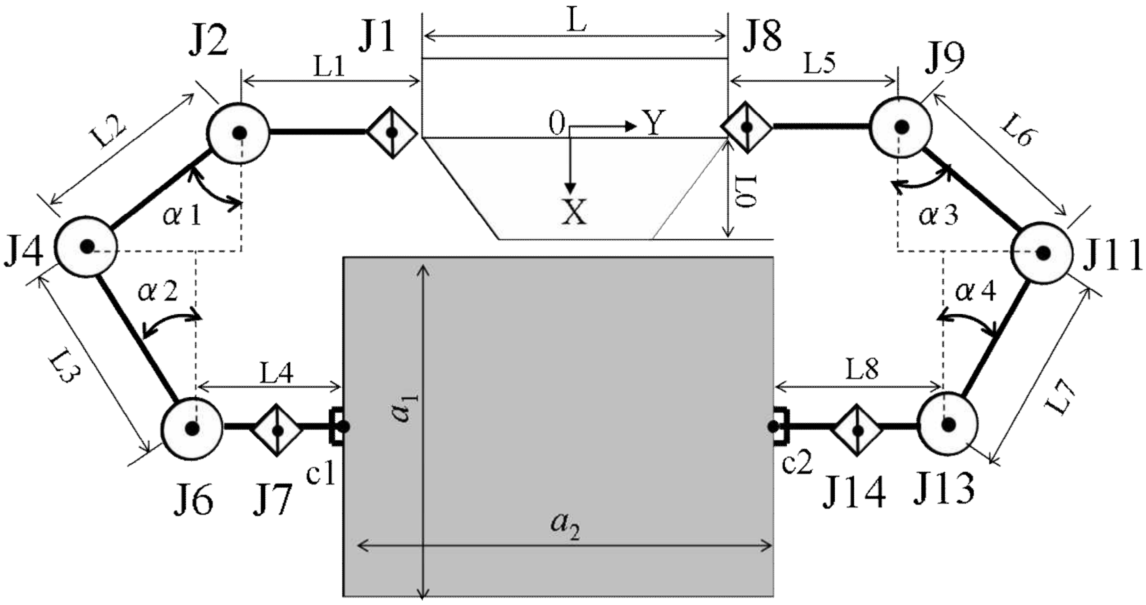


Fig.6.2 Size of robot

ここで，実験で使用したロボットの実サイズは L=500mm，L_0=210mm，L_1= L_5=150mm，L_2= L_6=380mm，L_3= L_7=360mm，L_4=385mm，L_8=420mm である．

また式(6-5)の拘束条件より，支持可能なプレート幅 a_2 が最大となるのは，α_1=0.189°，α_2=0°の時で、この時の最大幅 a_{1MAX}=1060mm，a_2=0 である．式(6-6)の拘束条件より，プレート長さ a_2 が最大となるのは，α_1=α_3=90°，α_2=α_4=0° の時で，その時の最大幅，a_{2MAX}=755mm，a_1≦300mm である．すなわち，式(6-6)より

$$L + L_1 + L_2 + L_5 + L_6 - L_4 - L_8 = a_{2MAX} \tag{6-7}$$

の関係となる．ここで，a_1 と a_2 の関係を線形と仮定すると a_{1MAX} と a_{2MAX} における a_1 と a_2 の関係より次式が得られる．

$$a_1 \leq -\frac{a_{1MAX} - 2(L_7 - L_0)}{a_{2MAX}} a_2 + a_{1MAX} \tag{6-8}$$

上式により, 支持可能なプレートの幅 a_1 と長さ a_2 の関係を求め図 6.3 に示す．プレートを操作する可能な a_1 と a_2 の組み合わせサイズは，式(6-8)の直線と両軸および a_{2MAX}=755mm の直線で囲まれる範囲である．また，プレートの中心座標を(a, b)，プレート上でボールを操作可能な範囲(X_p, Y_p) をプレートの中心から半径 rr の円の内部とすると，各種のプレートのサイズにおけるボールの操作範囲は不等式(6-9)で表される．プレートサイズが異なる場合の操作範囲を図 6.4 に示す．この図より，実験に使用するプレートの大きさを決定した．図中に実験用に採用したプレート（3 種類）を合わせて示す．図中の右上が標準姿勢で左右の腕が X_m 軸に対して線対称な姿勢である． 図中の左上がプレートをロボット

の最も右側に移動して保持した姿勢で左右の腕が非対称な姿勢である．図中の右下がプレートをロボットの最も前側で保持した場合で，X_m 軸方向に最も腕を伸ばしたオーバーハングの姿勢となる．

$$(X_p - a)^2 + (Y_p - b)^2 \le rr^2,\ \ L_7 \le a \le \frac{a_{1MAX}}{2},\ \ L_7 \le X_p \le \frac{a_{1MAX}}{2} \tag{6-9}$$

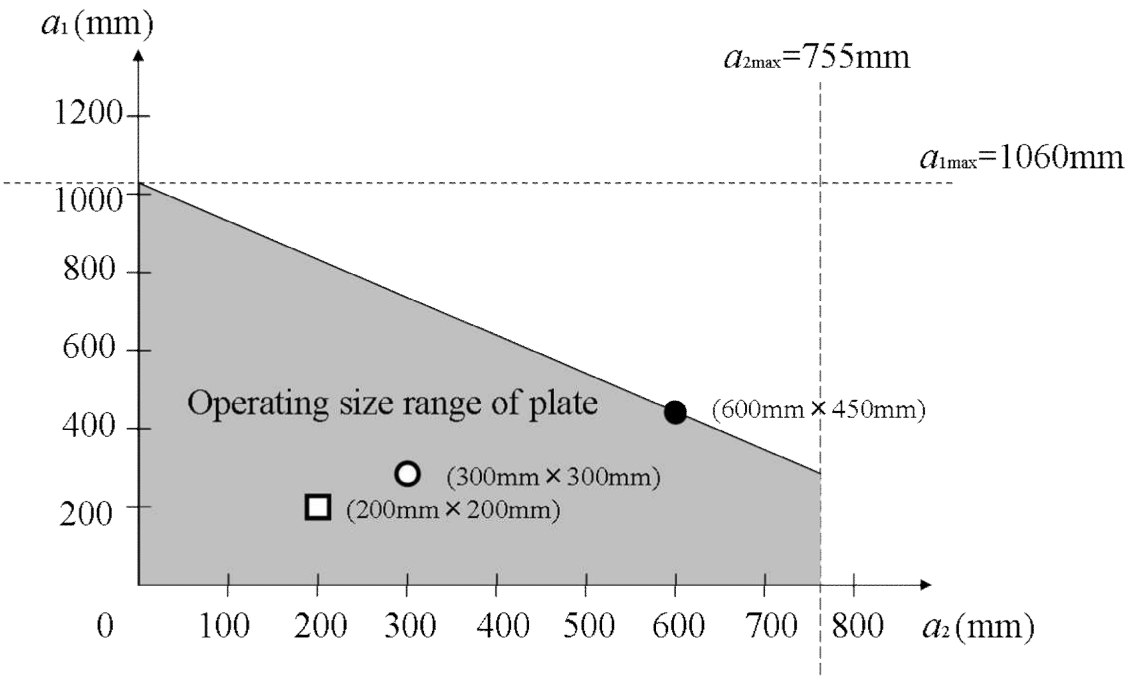


Fig.6.3 Operating plate size

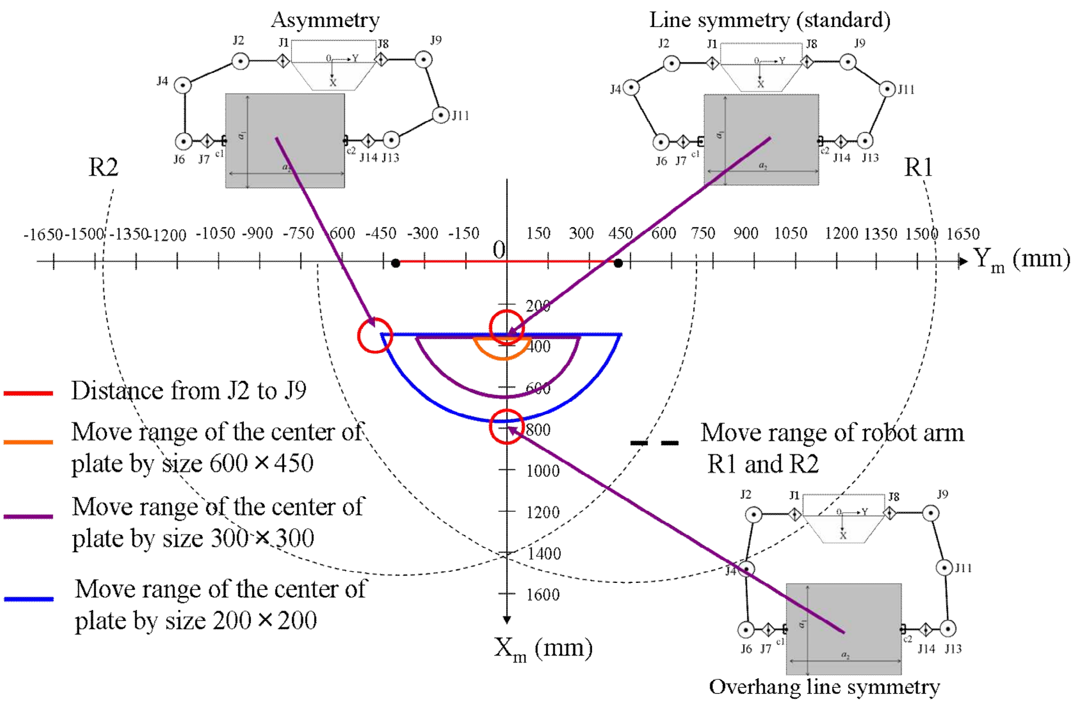


Fig.6.4 Different size plate move range by robot

6. 3　解析および実験結果と考察

6. 3. 1　旋回運動のティーチング方法

図 6.5 に現場でのロボットへの教示の様子を示す．ジャイロセンサーや水準器を用いて作業プレートの水平位置を決める．その位置から，プレートの θ_x を最大傾斜角度 θ_{x0} まで傾斜させて第 1 教示点を記憶させる．この時の傾斜角度の調整はジャイロセンサーでモニターするか，またはレーザーポインターを作業プレートに 45°傾けて取り付けて図 6.6 に示すようにビームを光拡大法でスクリーンに投影することで設定する．次に，θ_x を減少させゼロとし，その時に θ_y を最大傾斜角度 θ_{y0} に設定し，第 2 教示点として記憶させる．この操作を繰り返し，第 3，第 4 ティーチング点を記憶させる．また右手がマスター，左手がスレーブのマスタースレーブ方式で運動指令を構成している．これら指令値の関係を

θ_x-θ_y 線図として図 6.7 の実線に示す．θ_x および θ_y 軸上に存在する正方形の頂点が第 1～第 4 教示点(i=1～4)である. すなわち現場的には, 本手法により式 (2-15), (2-16) の三角関数波の入力指令を三角波で近似して動作させる.

図 6.4 に示す標準姿勢・大型プレートを用いて，θ_0＝3°，1 周期 T＝3.3s で運動させた場合の例が図 6.7 中の破線（θ'_y と θ'_x の関係）である. 式(6-3), (6-4) より，図 6.7 のように θ_y 軸と θ_x 軸から頂点がずれていることがわかる．このずれが θ_y 軸と θ_x 軸の旋回同期運動に位相差が生じていることを示している．旋回 2 軸が直交していない場合もこのような状況が現れる．また，θ_y 軸と θ_x 軸の交点で指令値との大きさが異なっている．これはそれぞれの軸の最大傾斜角の実運動と指令値（θ_{x0} , θ_{y0}）との差 (ゲイン) を表している．このように，双腕ロボットでのプレートの旋回動作においても本手法により運動精度を評価できることが分かる.

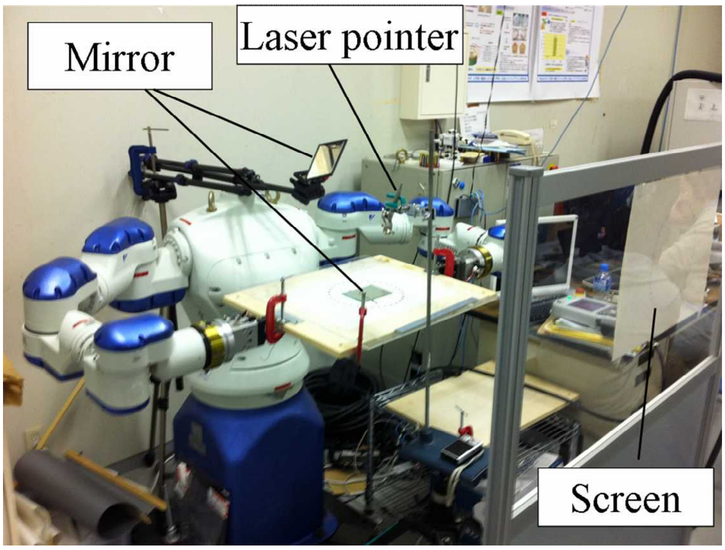


Fig.6.5 Experiment of accuracy measurement of rotational axis with a laser pointer

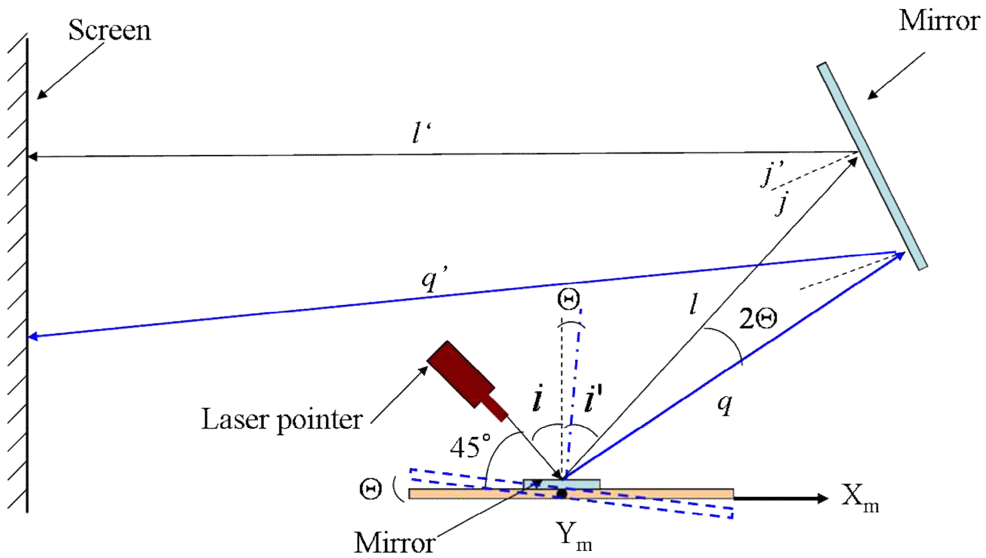


Fig.6.6 Model of accuracy measurement of rotational axis with a laser pointer

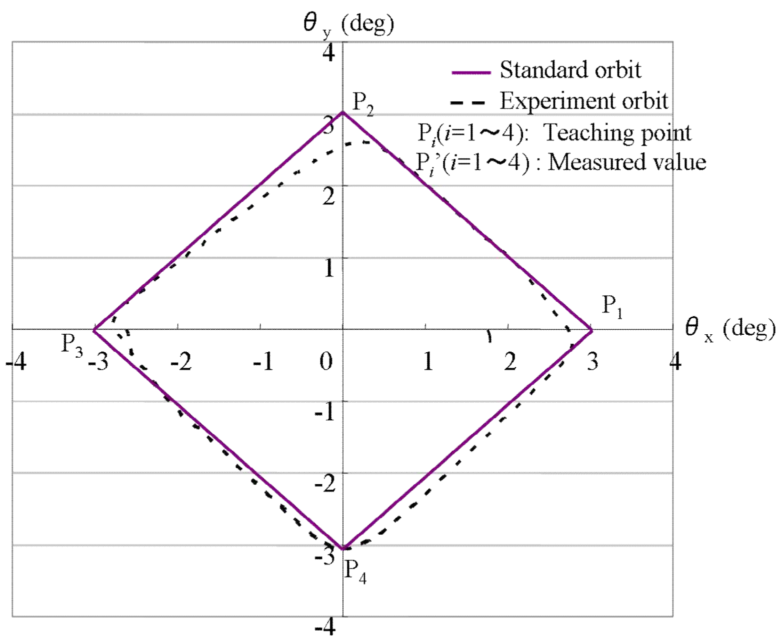


Fig.6.7 θ_x-θ_y diagram drawn with a laser pointer

6. 3. 2　大型作業プレートで運動させた場合の Y_m 軸まわりの運動誤差

大型作業プレート（図 6.3 中の黒丸点のサイズ）に対して，6.3.1 節の手法で教示後にプレイバックしてそのプレート角度の成分を計測した結果を図 6.8 に示す．本計測には，高精度ジャイロセンサー(クロスボー社製・姿勢方位基準装置 NAV440)を用い，プレートの中心位置で計測した．図 6.8 の結果より，X_m 軸まわりの結果は三角波に近い波形が得られるが，Y_m 軸まわりの結果は，傾斜角度＝0°すなわち角度の正負の切替りの位置で不連続な変化を示すことがわかった．この運動は手首 J7, J14 で与えているが，プレート支持部の平爪とプレート間のガタにより重力の影響する回転方向が変化したためと考えられる．この運動の特徴を考察するために，ωt の N 次のフーリエ級数展開による三角波と正弦波の関係を考える．N は三角波のフーリエ展開次数で、N=1, 3, 33 の場合の波形変化を図 6.9 に示す．図 6.9 より，N=1 の場合は正弦波であり，N=3 でもかなり三角波に近い波形になり，N=33 の場合は三角波にほぼ一致することがわかる．また三角波に対する振幅の割合は，N=1 で約 81%，N=3 で約 90%，N=33 で約 99%である．次に， 図 6.8 の実測値に対して残差の 2 乗が最小になる級数展開の次数を調べた．結果を図 6.10 に示す．図 6.10 より，X_m 軸まわりは N=9，Y_m 軸まわりは N=3 で近似できることがわかる．すなわち，両軸の周波数応答の特性差とその位相差を同時に近似する手法として有効であると考えられる．次に，N=9 と N=3 の有限級数展開を式 (3-9)，(3-10)，(3-11) に代入して計算した結果（最大傾斜角度 θ_0＝3°，周期 T＝3.3s）を図 6.11 に示す．図 6.12 は図 6.8 の条件における転がりボールの実軌跡の様子である．図 6.11 と図 6.12 はよく一致しており，シミュレーションによりボールの動きを予測でき，本手法により，ボー

ルの転がり軌跡から旋回同時 2 軸制御の運動精度（サーボ特性）を評価でき，図 6.12 の転がり軌跡の誤差は，Y_m 軸まわりのわずかな同期誤差の影響であることがわかる．また，三角波の指令下において系(図 6.13 参照)の持つガタ要素の違い，応答性の違いなどの影響をフーリエ級数展開の次数 N（周波数応答）の差としてモデル化でき，その影響をボールの転がり軌跡で評価できることもわかる．また，三角関数波で指令した場合，式 (6-3) において X_m 軸まわりおよび Y_m 軸まわりの最大回転角度に差が生じる($G_x \neq G_y$)時に転がり軌跡は X_m 軸または Y_m 軸に長軸が一致した楕円となり, そのドループに差がある($\alpha_x \neq \alpha_y$)時に楕円の長軸が X_m 軸または Y_m 軸に対して傾きを示すことが判明[35]しており．三角波で指令した時も同様の傾向を示すことを確認できた．

三角波で指令した場合，X_m 軸まわりと Y_m 軸まわりのプレート支持方法の違いによる影響を考えるために，ガタ要素について検討する．すなわち，Y_m 軸旋回を与える図 6.2 中の C_1，C_2 部に着目する．図 6.13 に示すように作業プレートの角部（$X_m= a_1/2$，$Y_m= a_2 /2$）に力（$-Z_m$ 方向）を加えて，その点の$-Z_m$ 方向の変位を測定して，角度誤差に変換した結果を図 6.14 に示す．図 6.14 中の原点付近で旋回方向の支持剛性が低く，旋回入力に対して非線形バネの特性を示している. その原因は Y_m 軸まわりをクランプする平爪とプレート間のガタ（図 6.13 中の角度誤差）と考えられる．すなわち，図 6.1(b)に示す双腕の旋回運動に対する支持剛性は X_m 軸まわりおよび Y_m 軸まわりで大きく異なるため，ボールの転がりに位相遅れ独特の軌跡が現れたことがわかった．

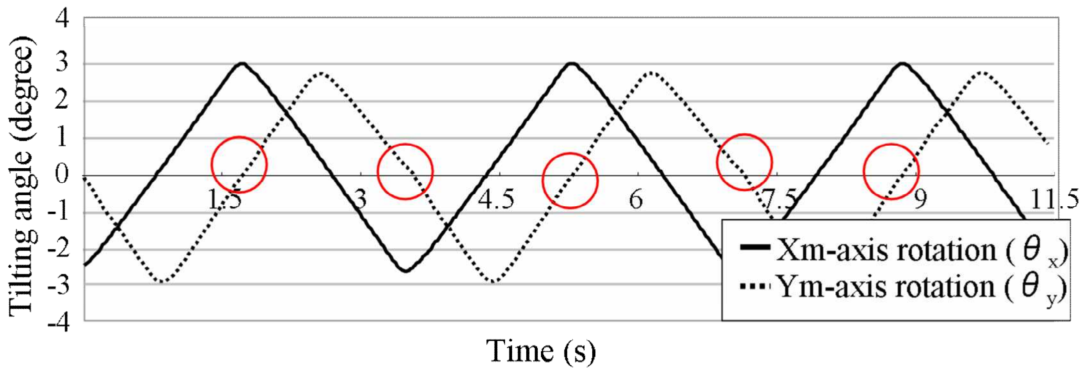


Fig.6.8 Measured tilting angle of working plate by experiment (θ_0＝3°, T＝3.3s)

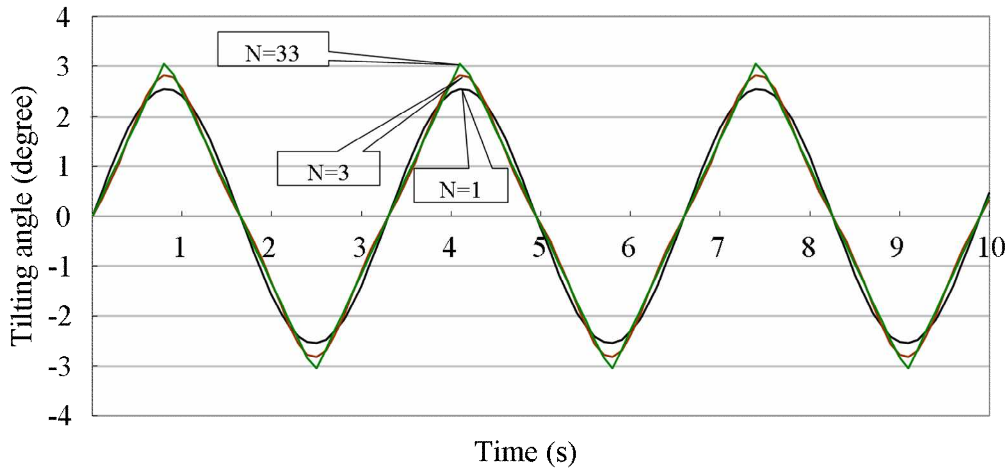


Fig.6.9 Fourier series of triangle wave

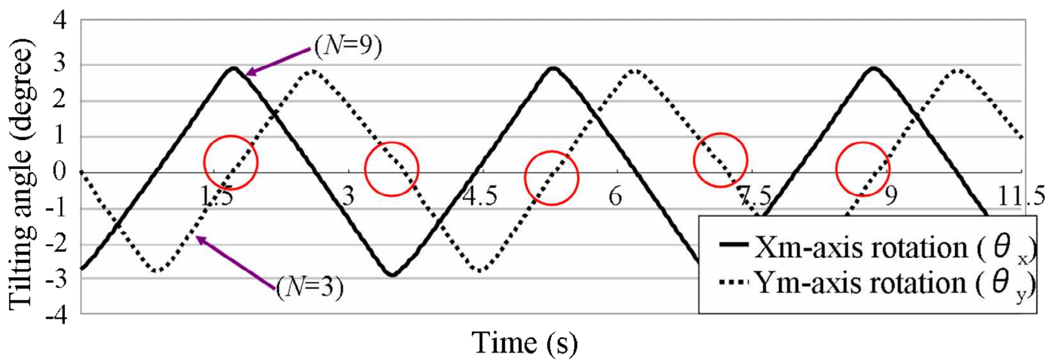


Fig.6.10 Tilting angle of working plate (θ_0＝3°, T＝3.3s)

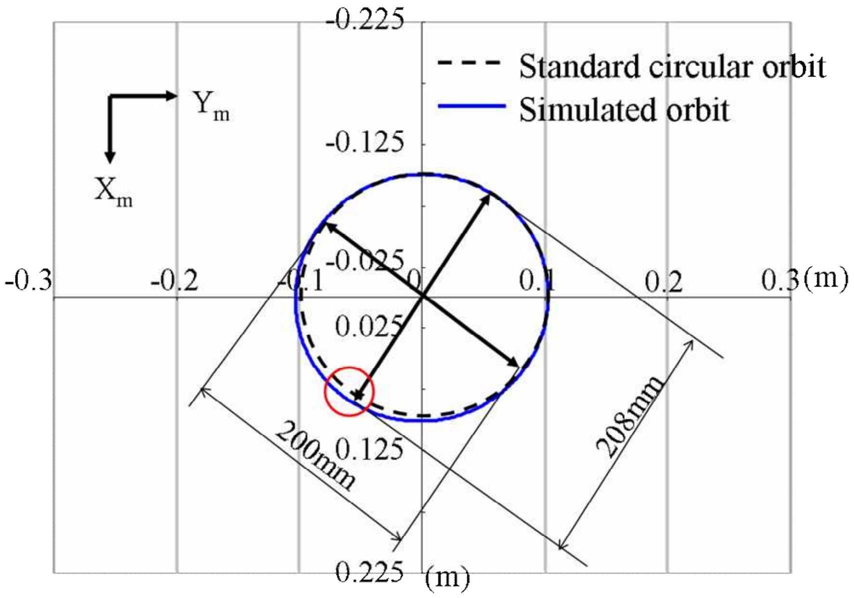


Fig.6.11 Rolling ball path on working plate by simulation

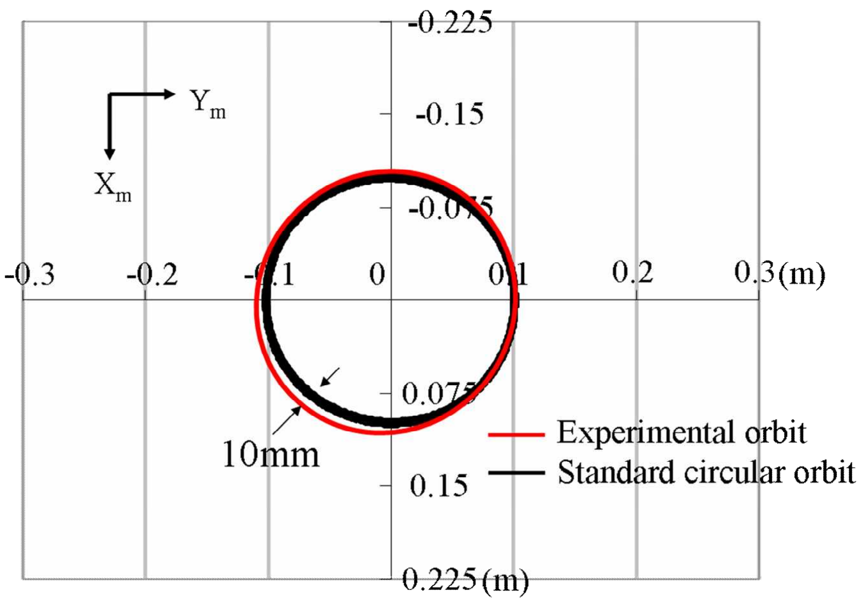


Fig.6.12 Rolling ball path on working plate by experiment

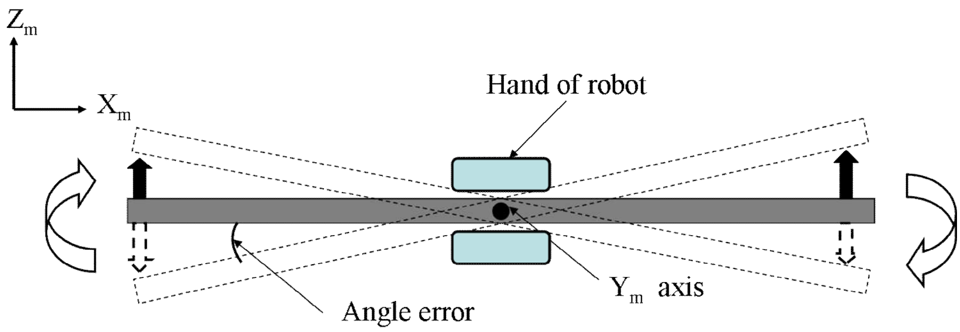


Fig.6.13 Stiffness of supporting plate in Y_m axis rotation

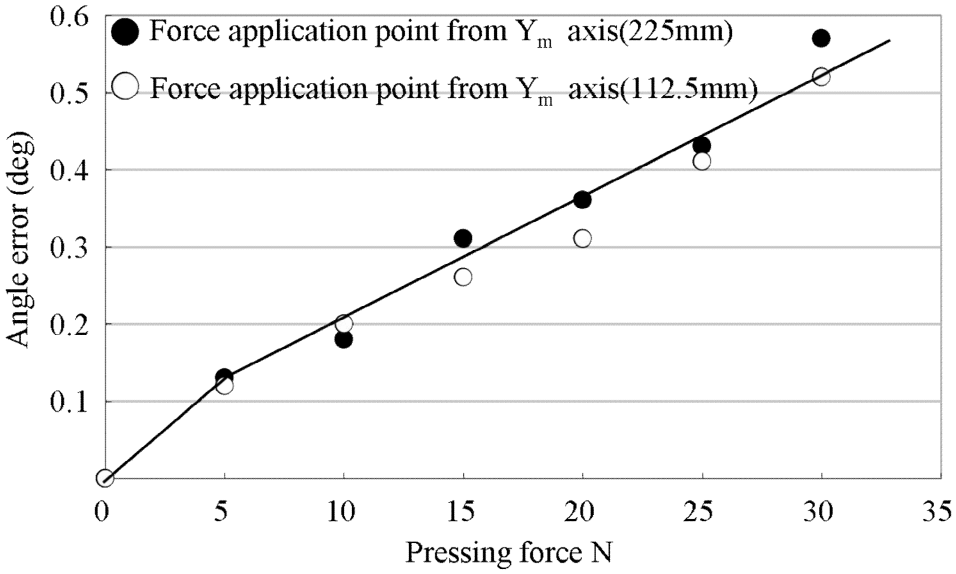


Fig.6.14 Influence of pressing force on angle of plate

6. 3. 3　ロボットの左右対称および左右非対称操りの運動精度と改善方法

3 軸および 5 軸制御の工作機械の運動精度の改善手法として DBB 法を用いた診断と補正が有効である．DBB 法は円運動指令に対する実運動の半径方向誤差を計測するものであり，その結果から制御系のソフト的な要素である周波数応

答特性を改善するだけでなく，系のハード特性に起因する誤差も現場で容易に診断して補正に利用できるものである．そこで双腕ロボットにおいても，その応用を試み，ボールバーの両端（ボールバーの長さ l=100mm）を左右腕で支持して，X_R-Y_R, Y_R-Z_R, X_R-Z_R 平面で半径 100mm の円運動をさせた．ボールバーをロボットの中心に保持して左右腕の保持姿勢が左右対称の場合，さらに図 6.15 に示すようにロボットの本体の右側に寄せて左右腕の姿勢が非対称になった場合について送り速度を変化して計測した．代表的な結果を図 6.16 に示す．図より，不連続に誤差が生じる箇所が存在することがわかる．特に Z_R 軸が関係する平面において Z_R 軸上の不連続な誤差が生じる運動は主に関節モータの運動反転時に生じるバックラッシュで最大の運動誤差の要因であることがわかる．そこで最大の誤差要因に着目して, 図 6.17 に示すように DBB 指令における円運動の基準円より大きな径を正，小さな径を負として，その不連続な点の半径誤差 ΔR の最大値を ΔR_{MAX}，最小値を ΔR_{MIN} として次に示す補正のための基礎データとする. またこれらのデータは, 腕 (左右), 回転方向 (CW, CCW), 回転平面 (X_R-Z_R, Y_R-Z_R)で整理できる.

左腕固定で，右腕の送り速度を変化させた場合の半径誤差を図 6.18(a) , (b)に示す．右腕固定で，左腕の送り速度を変化させた場合の半径誤差を図 6.18(c) ,(d)に示す．送り速度は円運動中心からみた角速度を示しており，半径誤差の周波数応答特性が判明することになる．すなわち，動作の周期による誤差の変化量を容易に把握することができる．そこで，図 6.18 の DBB 計測の結果を用いて，バックラッシュに基づく誤差を補正することを考える．また図 6.7 の結果，プレートの支持構造を考慮すると，目標値である指令角度ベクトル P_i（θ_{xi}, θ_{yi}）に対して，実運動角度ベクトル P_i'（θ'_{xi}, θ'_{yi}）は互いに独立でないと考えられる．そこで，入力である教示角度ベクトルと出力である実運動角度ベクトルは線形

関係にあると仮定すると，それらの関係は式(6-10)のように表すことができる．

$$
\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \theta'_{xi} \\ \theta'_{yi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta'_{xi} - \theta_{xi} \\ \theta'_{yi} - \theta_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\theta_{xi} \\ \Delta\theta_{yi} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} \delta_{mxi} \\ \delta_{myi} \end{bmatrix} \right) \\
&= \begin{bmatrix} \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{bmatrix} + \left[E \right] \begin{bmatrix} \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\varepsilon_{xxi} & \varepsilon_{xyi} \\ \varepsilon_{yxi} & 1+\varepsilon_{yyi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{bmatrix}, (i = 1 \sim 4)
\end{aligned}
\tag{6-10}
$$

ここで，$\Delta\theta_x$，$\Delta\theta_y$ は角度誤差，$[E]$ は誤差係数行列である．DBB 法による半径誤差の測定結果 (図 6.17) よりバックラッシュ誤差は Z_R 軸方向に出ているため，その誤差をプレートの回転角度に変換すると $\varepsilon_i = \mathrm{Arcsin}(\Delta R/\ a_2)$となり，これを用いて誤差係数行列$[E]$の各成分を求めることができる．また，$i$ (i=1～4) は図 6.7 中の教示点に対応している．

この場合，入力から出力への変換行列（上式で最終項の行列）を実験より正確に求められれば，その逆行列を実験時の教示ベクトルに乗じたものを教示角度ベクトルとすることで，実運動角度ベクトルを目標値に一致させることができる．

しかし，実験により正確に誤差係数行列$[E]$を求めるのは困難であり，実際には式(6-10)中に示すように計測誤差(δ_{mxi}，δ_{myi}) が含まれ，その大きさは不明である．そのため，誤差を含んだまま逆行列を求めるとその誤差が拡大し，式(6-10)により教示角度ベクトルを求めても，元の教示ベクトルよりも結果は悪化することになる．そこで，式(6-10)中の計測誤差を左辺に移行し，式(6-11)のように変形する．計測誤差は式(6-10)の計算結果と実験結果の差により推測した．これにより，計測誤差を低減しこの場合，(θ''_{xi}，θ''_{yi}) には大きさ不明の計測誤差が含まれることになるが，逆行列計算での誤差拡大を防ぐことができると考えた．

$$
\begin{bmatrix} \theta'_{xi} \\ \theta'_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta'_{xi} - \delta_{mxi} \\ \theta'_{yi} - \delta_{myi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\varepsilon_{xxi} & \varepsilon_{xyi} \\ \varepsilon_{yxi} & 1+\varepsilon_{yyi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{bmatrix} \tag{6-11}
$$

次に具体的な誤差係数行列の求め方を述べる．例として，式(6-11)中の ε_{xx1} と ε_{xy1} を取り上げて説明する．ε_{xx1} は図 6.7 の教示点 P_1 の X_m 軸まわりの指令角度に対する X_m 軸まわりの回転角度誤差である．教示点 P_1 への動作は左右腕を X_m 軸まわりに回転させ，CW 回転である．まず，CW 回転であるので，図 6.18(a), (c)を用いる．また，X_m 軸まわりの回転であるため，Y_R-Z_R 平面のデータを見る．図より左右腕の最大半径誤差を読み取り，両 ΔR_{MAX} の差をプレートの回転誤差に換算すると ε_{xx1} が求められる．次に，交互作用項である ε_{xy1} の求め方について説明する．交互作用の原因についてはさまざま考えられるが，Y_m 軸まわりによるバックラッシュがそのまま X_m 軸まわりの回転に誤差を与えていると考えた．そこで，図 6.17 より Y_m 軸まわりのバックラッシュ量(Y_R-Z_R 平面) は，X_m 軸まわり(X_R-Z_R 平面)と反対方向に出るため，図より左右腕の ΔR_{MIN} の差が影響すると考え，その差をプレートの回転角度に換算して求める．図 6.7 の教示点 P_1 の誤差係数の計算結果は図 6.19 (a), (b)に示す．他の誤差係数行列の要素についても同様にして求められる．

次に，目標値 (θ_{xi}, θ_{yi}) を式(6-12)に代入すると，各教示点の実教示角度 (θ''_{xi}, θ''_{yi}) が算出される． すなわち，プレート支持が予想される姿勢付近で事前に DBB 法により生ずる誤差の周波数応答から，上述のようにボールの回転周期に合わせて誤差係数行列[E]を作成し，実教示角度（θ''_{xi}，θ''_{yi}）を現場で教示すれば目標である最大角度（θ_{xi}，θ_{yi}）が得られる．

$$\begin{bmatrix} \theta''_{xi} \\ \theta''_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\varepsilon_{xxi} & \varepsilon_{xyi} \\ \varepsilon_{yxi} & 1+\varepsilon_{yyi} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{bmatrix}, (i=1\sim4) \tag{6-12}$$

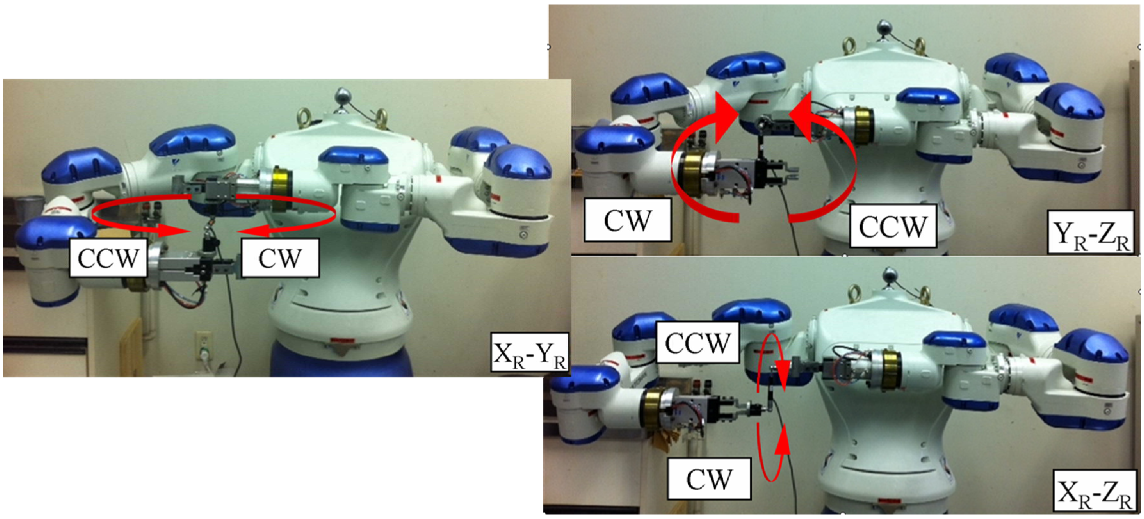
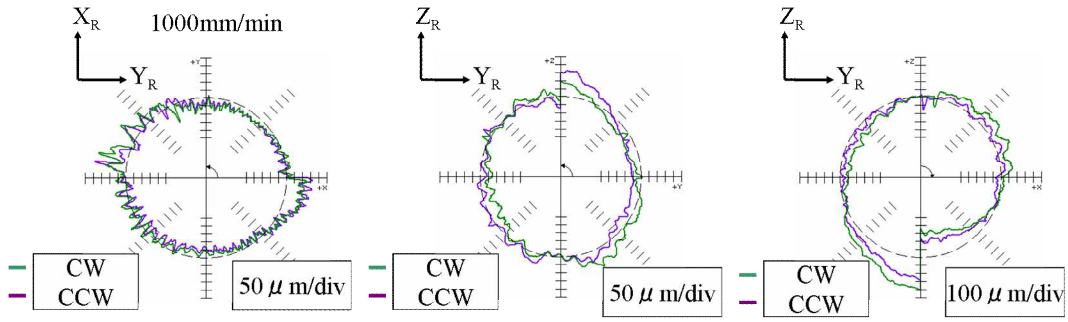
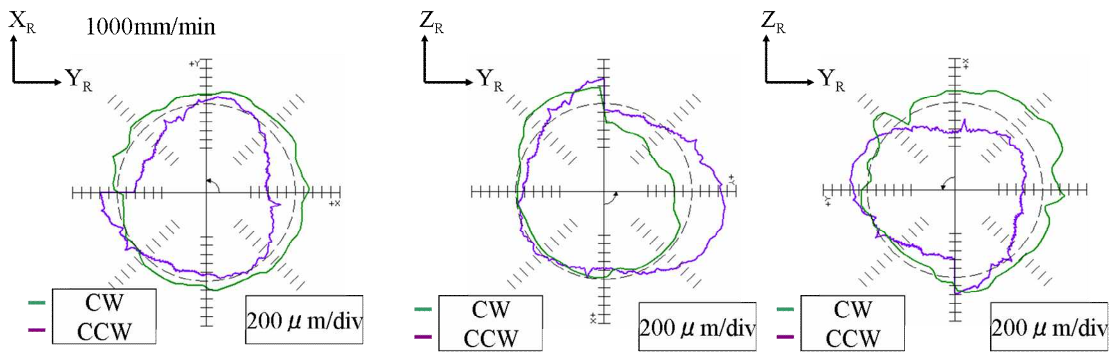


Fig.6.15 Setup for DBB evaluation (left arm and right arm fixed with same pose)

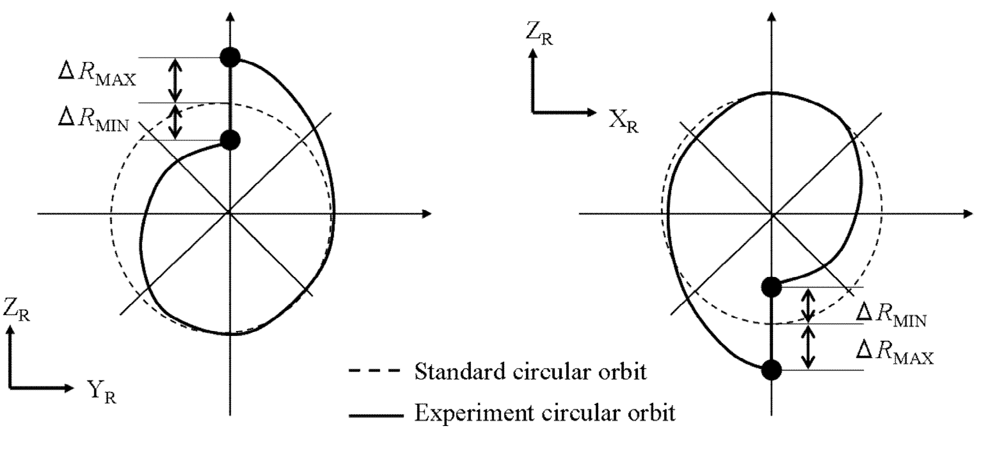


(a) Left arm fixed by forwarding speed 1000mm/min



(b) Right arm fixed by forwarding speed 1000mm/min

Fig.6.16 Motion accuracy of robot by DBB method



(a) Y_R-Z_R plane orbit (b) X_R-Z_R plane orbit

Fig.6.17 Definition of maximum error from DBB result

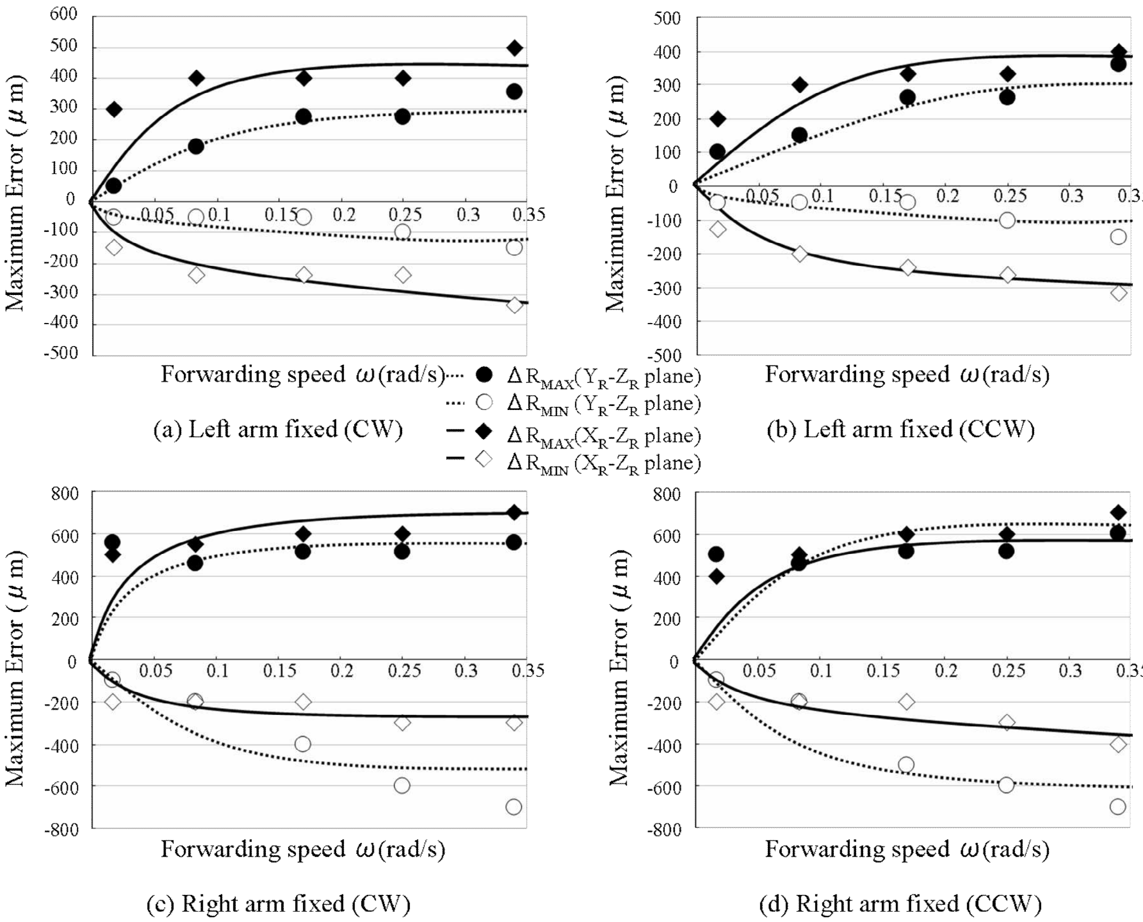


Fig.6.18 Influence of operating speed on DBB maximum error

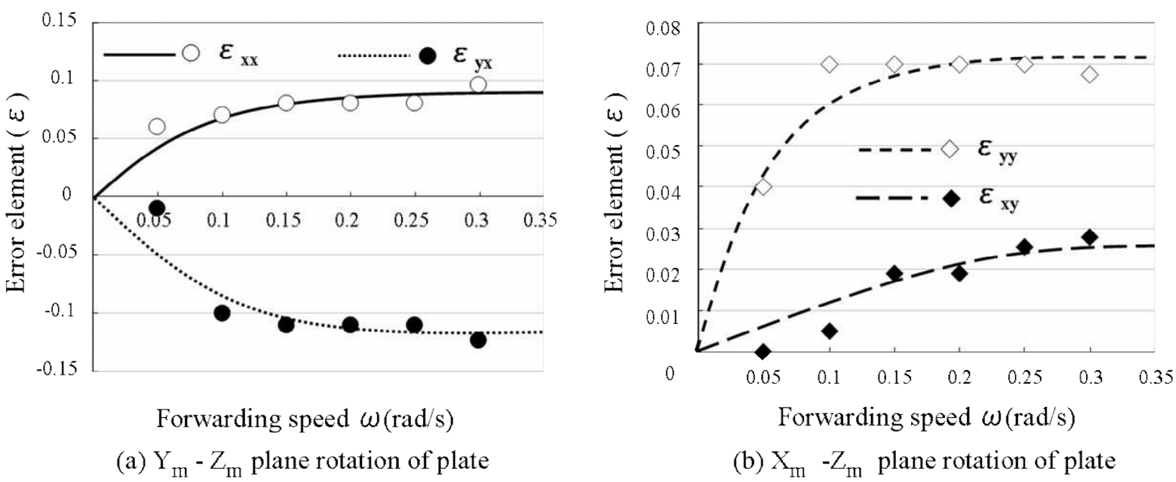
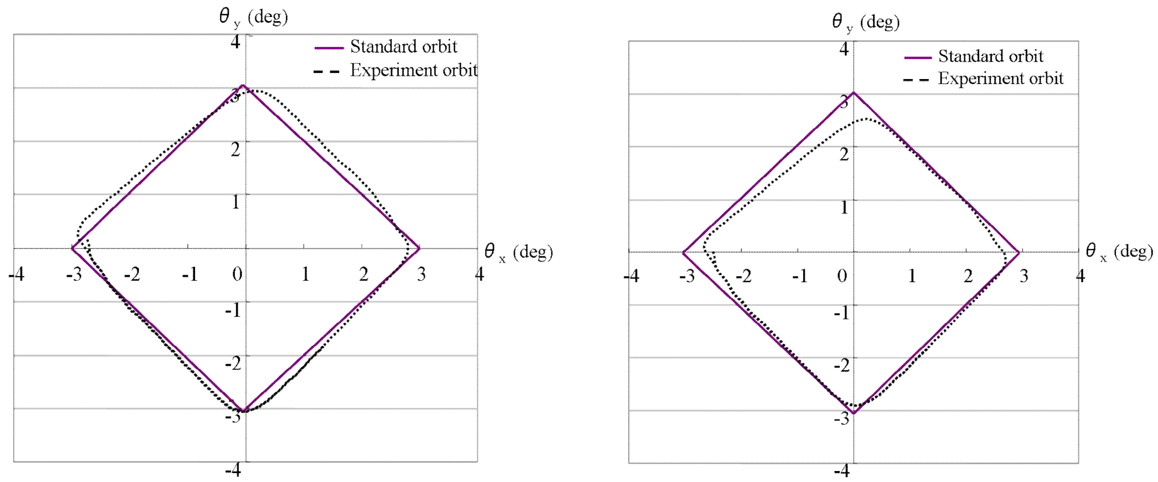
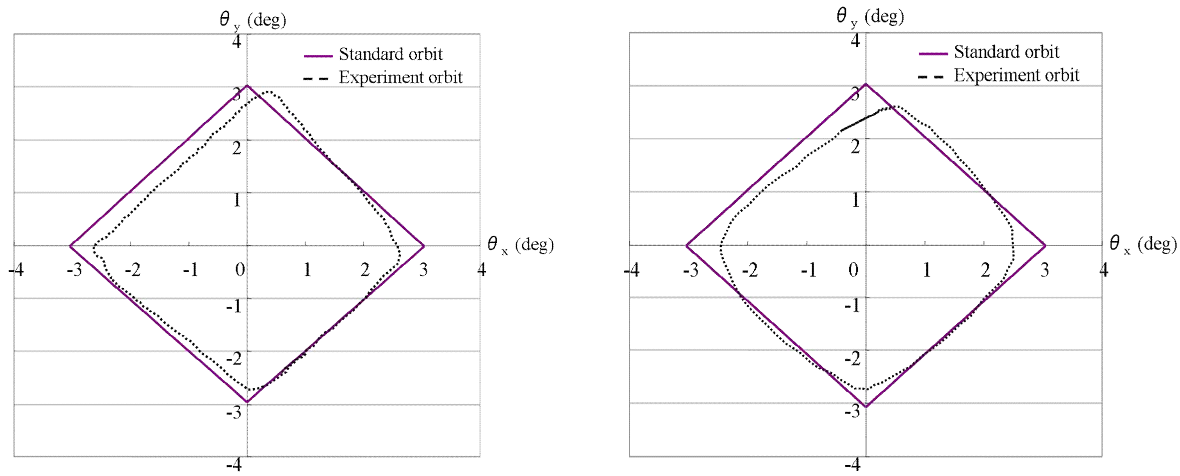


Fig.6.19 Influence of operating speed on error element (P_1)



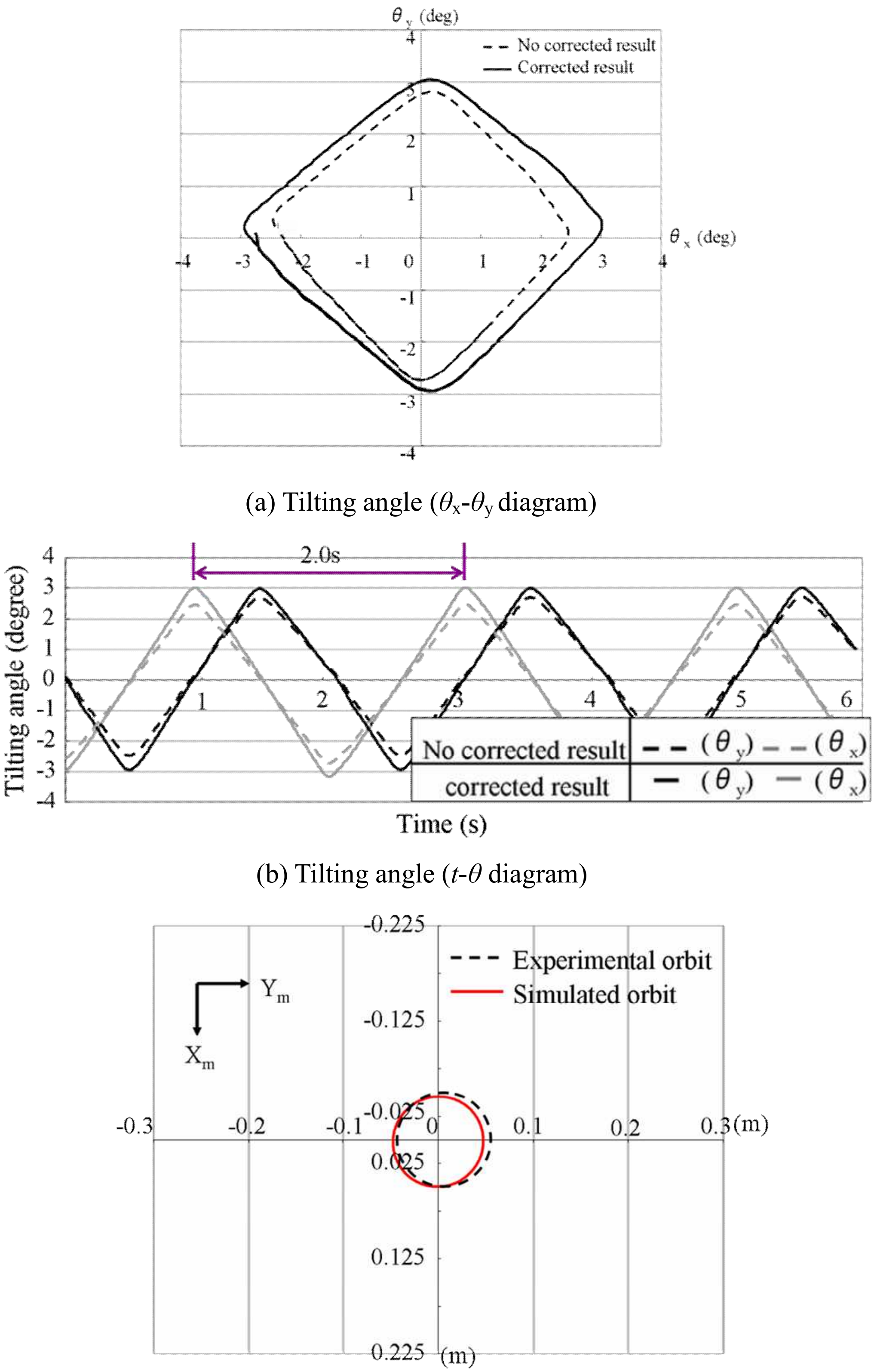
(a) slow speed (0.063rad/s)　　　　(b) fast speed (0.16rad/s)

Fig.6.20 θ_x-θ_y diagram in symmetric plate support



(a) slow speed (0.063rad/s)　　　　(b) fast speed (0.16rad/s)

Fig.6.21 θ_x-θ_y diagram in asymmetric plate support



(a) Tilting angle (θ_x-θ_y diagram)

(b) Tilting angle (t-θ diagram)

(c) Rolling orbit (Tilting angle θ_0=3°, T=2.0s)

Fig.6.22 Experiment result with preceding correction

6. 3. 4　非対称の姿勢による支持に対するケーススタディ

ロボット姿勢の左右対称と非対称の場合について，中型プレートを支持しプレート中心にジャイロセンサーを設置して，(Tilting angle θ_0＝3°，T＝3.3s，T＝1.3s)の条件で実験を行った．左右対称の場合の測定結果を図 6.20 に，左右非対称の場合の測定結果を図 6.21 に示す．図 6.20 と図 6.21 を比較すると，非対称な支持では誤差が一層大きく, 特に角速度が大きくなると 0.5°以上の誤差も生じていることがわかる．また，角速度が大きくなると θ_x-θ_y 線図において実測値が描く図形は，正方形から平行四辺形に近い形状に変形していくこともわかる．この非対称な姿勢において，プレート上にボールを転がしてもプレート内に転がり運動が収まらなく，ボールがプレートから落下する結果になった．このような場合，従来は教示の補正を現場において試行錯誤に繰り返してプレート上でのボールの転がり円運動を実現するしかなかった．そこで，最も操り動作が難しい小型プレートを用いて，ロボットがプレートを非対称姿勢で操る場合について，前節で提案した手法を適用し，その有用性を検討した．

目標値ベクトル（θ_{xi}，θ_{yi}）に対して，実教示ベクトル（θ''_{xi}，θ''_{yi}）を式(6-11)より算出し，教示した結果の一例を図 6.22 (a)，(b)に示す．またそのプレート操り運動において，プレート上にボールを置いた場合の転がり円運動軌跡の実測値およびシミュレーション結果を図 6.22 (c)に示す．図 6.22 (a)の θ_x-θ_y 線図において，実測値の描く頂点の位置が狙いとする理論値にかなり近くなり，また平行四辺形より正方形に近い所まで補正・改善ができていることがわかる．これは，前節で本手法を提案するうえで行った種々の仮定が妥当であったためと考えられる. さらに図 6.22(b) (c)をみても 6.3.2 節で考察した Y_m 軸まわりの支持特性により生じる誤差が少し残っているが，小型プレート上でも十分に安定したボールの転がり円運動が遂行できていることがわかる．したがって，プレート

上でボールの転がり運動を制御する場合，ロボット双腕の運動にバックラッシュが存在し，運動精度が大幅に低下する場合でも，本手法により現場においても効率的に運動精度を補正するための実教示角度を求められることが分かった.

6. 4　結　　言

産業用双腕ロボットの正面に作業プレートを保持する姿勢の中で，プレートの基本高さは一定にしたまま水平方向に保持位置を変化させてボールの転がり運動を操る場合について考察した．特にプレートを 4 点ティーチングで動作させ，プレート上にボールの転がり円運動を具現化させる場合について検討した．その結果をまとめると以下の通りである.

(1)　ボールの転がり軌跡から旋回同時 2 軸制御の運動精度（サーボ特性）を評価が可能であり，転がり軌跡の誤差は両軸の旋回運動におけるわずかな同期誤差の影響であることがわかった．また三角波の指令下において両軸間におけるガタ要素の違い，応答性の違いなどの影響をフーリエ級数展開の次数 N（周波数応答）の差としてモデル化でき，その影響をボールの転がり軌跡で評価できることもわかった.

(2)　DBB 法を用いて両腕のプレート支持位置における運動誤差の周波数特性を調べ，その結果に基づいてプレートの旋回 2 軸運動において必要となる指令角度ベクトルに対して，現場で実際にティーチングする狙い角度ベクトルを算

出する手法を提案した．

(3)　提案した手法を用いて，各種の大きさのプレートおよびその支持姿勢を変化させて場合について検証した．その結果，ロボットが保持可能な最大サイズに近い大型プレートからその 1/2 以下の小型プレート上でも十分に安定したボールの転がり円運動が遂行できた．したがってプレート上にボールの転がり運動を制御する程度の範囲において，提案する手法により効率的に現場における実ティーチング角度を探索できることがわかった．

第 7 章　結　　論

本章では，これまで述べてきた各章の結言の要点をまとめ，本研究によって得られた成果を明確にする．

本論文ではロボットが道具を操る問題の中でも，双腕ロボットがプレートを操る運動について考察した．その中で，現場で簡易的に 2 軸同期の旋回運動の運動誤差を診断する方法として，作業プレート上に円軌道のボールの転がり運動を創成し，その転がり軌道の基準円に対する誤差を用いる新しい手法を提案した．その手法を用いることで，双腕ロボットの新たな応用方法として，工作機械の NC 制御に近い運動精度と産業用ロボットの自律性を両立するための指針が得られた．

第 1 章から第 7 章で，得られた結果を総括すると以下のようになる．

第 1 章では，本研究の背景および目的，また内容について述べた．

第 2 章では，FA (Factory Automation) における双腕ロボットの新しい応用を目指した最初のステップとして，双腕ロボットに作業プレートを支持することで閉リンク機構を構成して，エンドエフェクターとして十分な支持剛性を維持しながら，作業プレートを操ることで，プレート上で柔軟な作業空間を実現することを試みた．作業プレート上の画像情報からフィードバックする制御も考えられるが，本研究では最初のステップとして両腕の同時 14 軸制御における基本性能をベースにして，作業プレートの支持方法を考察し，さらに支持した作業プレートに双腕の協調制御による旋回運動を与えることで，プレート上に球のなめらかな転がり円運動を実現できることを示した．さらに当該運動の結果からその改善について考察した．その結果として，平面の作業プレート上にボールを転がり円運動させるような作業において十分な精度が確保されていること

が判明し，本手法は十分に実用域にあるこがわかった．しかしながら，肩部などの特定の 1 軸の反転運動後に生じる振動により運動に同期誤差が生じるため，操作角度だけではなく，当該現象も考慮して改善を進める必要があることもわかった．また，直交する回転 2 軸の運動制御において，転がりボールの運動を制御することで，その運動精度を判定することが可能である．すなわち，X_m 軸また Y_m 軸に沿って楕円運動を生じる時は X_m 軸と Y_m 軸の最大傾斜角の不一致が生じている．また，楕円の軸が X_m 軸また Y_m 軸と一致していない時は，両軸の運動の位相差に誤差を生じ，サーボの不一致が生じていることがわかった．

第 3 章では，双腕ロボットに作業プレートを支持して双腕の協調制御による同時 2 軸制御の旋回運動を与え，プレート上で球の転がり運動軌跡を解析することで，その運動精度の具体的な評価について考察した．その結果，ボールの転がり運動においてプレート回転中による遠心力を考慮することで，転がり運動の過渡応答から定常応答まで，それらの軌跡を精度よく予想できることがわかった．また，同時 2 軸の旋回運動において，プレート上のボールの運動軌跡が楕円でその長軸が X_m 軸または Y_m 軸と一致する場合，両軸間で最大角度に誤差が生じている．一方，楕円の長軸が X_m 軸または Y_m 軸と角度を有する場合，ドループの不一致などに起因する位相誤差が生じていることが計算および実測から示された．したがって，モデルによるシミュレーションを併用すれば，ボールの転がり軌跡をモニターすることで，簡易的ではあるが，同時 2 軸で旋回運動するプレートの運動特性の改善のための有効な手法の 1 つになることがわかった．また，使用するプレートとボールの組み合わせを工夫することで，プレートの大きさ，旋回運動の角周波数，最大角度が変化しても，本手法はある程度対応できる可能性を示すことができた．

第 4 章では，提案する手法において使用する転がりボールの特性を変化させ

た場合を取り上げ，診断に用いる適切なボールの選定に関する考察を行った．さらに旋回軸の旋回運動にオフセット角度誤差が存在し，ボールの転がり運動の中心と旋回軸の旋回中心が一致しない場合について取り組んだ．その結果より，作業プレートを同時 2 軸制御で旋回運動させる場合について，より一般性の高い現場における簡易的な運動精度の診断法について考察を遂行した．また，高い周波数帯まで十分な応答特性を確保したい場合，外径が大きな中空ボールを選択すると良いことがわかった．ただし中空ボールに関しては，効果を期待するためには内外径比（=外径/内径）で 0.8 程度以上を用いる必要があることもわかった．さらに，中空ボールは直進軸方向の運動誤差の影響も受けやすいため，そのような外乱が予想される場合には適さないこともわかった．その一方で，プレートの X_m (Y_m)軸の旋回制御の角度にオフセット角度誤差がある場合，転がり円軌跡の中心が移動することがわかった．したがって，最大角度誤差および同期誤差（位相差）および角度のオフセット誤差は，転がり軌跡の楕円の長軸と短軸の比およびそれらの X_m 軸または Y_m 軸となす角度，および中心の位置を調べることで診断が可能であることが示された．また，半径が小さく減衰係数も小さなボールを用いれば，小さな運動誤差でも検出が可能になる一方で，検出できる誤差の範囲が狭くなり，逆に，外径が大きく減衰係数も大きなボールを用いれば，小さな運動誤差の検出感度は下がる一方で，検出できる誤差の範囲が広くなることもわかった．したがって，事前に式(4-3)～式(4-5)に基づいて予想される運動誤差を考慮して，適切に用いるボールを選定する必要があることもわかった．

第 5 章では，ボールとプレート間の転がり摩擦係数を変化させた場合を取り上げ，その検出感度に与える影響を考察することで提案する手法の一般性を広げた． その結果，コンパクトロボットによる小面積のプレートの操り動作など

への応用を考える場合，共振現象などの不安定運動に注意する必要があるが，転がり半径が小さくても十分な誤差を出すために密度の低い小さなセラミックスボールなどの使用が有効な手段になる．また，提案する手法は動画からの画像解析に基づいており，その画素のサイズと運動の角度誤差や同期誤差の検出感度の関係を検討した．その結果からも，双腕ロボットにプレート支持をして 2 軸同期の旋回運動を行った場合に生じる運動誤差に対して十分な検出感度を有しており，現場的にも有効な手法であることが示された．

第 6 章では，産業用双腕ロボットの正面に作業プレートを保持する姿勢の中で，プレートの基本高さは一定にしたまま水平方向に保持位置を変化させてボールの転がり運動を操る場合について調べた．特に，工場現場で産業用ロボットに用いられている Point to Point 指令（ティーチング・プレイバック方式による作業指令）をベースにして指令角度を三角波で与えた場合についてのプレートの旋回運動の誤差を考察して，双腕ロボットによる支持の特徴に起因する現象を解明した．さらに誤差要因の DBB 診断に基づき，現場で容易に補正するための方法を検討した．特にプレートを 4 点ティーチングで動作させ，プレート上にボールの転がり円運動を具現化させる場合について検討した．その結果，ボールの転がり軌跡から旋回同時 2 軸制御の運動精度（サーボ特性）を評価が可能であり，転がり軌跡の誤差は両軸の旋回運動におけるわずかな同期誤差の影響であることがわかった．また三角波の指令下において両軸間におけるガタ要素の違い, 応答性の違いなどの影響をフーリエ級数展開の次数 N(周波数応答)の差としてモデル化でき，その影響をボールの転がり軌跡で評価できることもわかった．また，DBB 法を用いて両腕のプレート支持位置における運動誤差の周波数特性を調べ，その結果に基づいてプレートの旋回 2 軸運動において必要となる指令角度ベクトルに対して，現場で実際にティーチングする狙い角度ベ

クトルを算出する手法を提案した．さらに，提案した手法を用いて，各種の大きさのプレートおよびその支持姿勢を変化させて場合について検証した．その結果，ロボットが保持可能な最大サイズに近い大型プレートからその 1/2 以下の小型プレート上でも十分に安定したボールの転がり円運動が遂行できた．したがってプレート上にボールの転がり運動を制御する程度の範囲において，提案する手法により効率的に現場における実ティーチング角度を探索できることがわかった．

第 7 章では，本研究で得られた結果を総括し，双腕ロボットの双腕協調制御によるプレートの操り問題におけるその運動精度の向上に関する指針を示した．

以上より，ロボットが道具を操る問題の中でも，特に双腕ロボットが作業プレートを操る問題についてその特性の解明と双腕協調制御の運動精度の向上を達成するための有効な手法が開発できたものと考える．本研究の成果は，次世代の FA システムや生産システムの高度化に寄与するものと考える．

参考文献

(1) 経済産業省製造産業局産業機械課, “2012 年ロボット産業の市場動向調査結果概要”, 経済産業省，(2012), pp. 1-5.

(2) 楠田喜弘，“産業用ロボット技術発展の系統化調査”，国立博物館技術の系統化調査報告第 4 集，(2004), pp. 1-23.

(3) 本台進，“日本ロボット産業の現状と課題”，国際東アジア研究センター，(2007), Vol.2007，No27，pp. 1-11.

(4) 山岸正謙， “NC 工作機械の入門”，東京電機大学出版局，(2009), Vol.66，No.647，PP. 11-52.

(5) 古屋信幸，岩月正幸，「SCARA 型ロボットの運動制御の高精度化に関する研究」『精密工学会』，(1988), Vol.977, pp. 173-178.

(6) 中川昌夫，梨木政行，垣野義昭，井原之敏，「Hexapod 型パラレルメカニズム工作機械の精度向上に関する研究」『精密工学会誌』，(2001), Vol.67, pp. 1333-1337.

(7) 垣野義昭，井原之敏，亀井明敏，伊勢徹，”NC 工作機械の運動精度に関する研究（第 1 報）DBB 法による運動誤差の測定と評価”，精密工学会誌，(1986) , Vol.52，No.7，pp.1193-1198.

(8) 垣野義昭, 井原之敏, 中津善夫, “NC 工作機械の運動精度に関する研究(第 2 報）—DBB 法による運動誤差原因の診断”，精密工学会誌，(1986), Vol.52，No.10，1739-1745.

(9) 垣野義昭，井原之敏，中津善夫，“NC 工作機械の運動精度に関する研究(第 3 報)—サーボ系の性能が運動精度に及ぼす影響”，精密工学会誌，(1987)，Vol.53，No.8，1220-1226.

(10) 垣野義昭，井原之敏，中津善夫，“NC 工作機械の運動精度に関する研究(第 4 報)—円弧補間時の半径減少の NC 補正”，精密工学会誌，(1988), Vol.54，No.6，1113-1118.

(11) 井原之敏，田中和也，”多軸工作機械での円錐台加工試験に対応したボールバー測定法（第 1 法）主軸旋回型 5 軸 MC でのボールバー測定と実加工との比較”，精密工学会誌，(2005) , Vol.71，No.12，pp.1553-1557.

(12) 呉魏，廣垣俊樹，青山栄一，双腕ロボットを用いた作業プレートの操り制御に関する基礎的研究，同志社大学理工学研究報告，(2010), Vol.51, No.1，pp.9-15.

(13) 渋川哲郎, 遠山退三, 服部和也, “パラレルメカニズム形切削加工機”, 精密工学会誌，(1997), Vol.63，No.12，PP. 1671-1675.

(14) 松下哲也，沖忠洋，松原厚，“テーブルチルト型 5 軸制御工作機械によるテーパーコーン加工精度”，精密工学会誌，(2008), Vol.74，No.6，PP. 632-636.

(15) 平野剛，山本元司，毛利彰，“2 台のマニピュレータを用いる凹対象物内壁の倣い作業計画”，日本機械学会論文集（C 編），(2000), Vol.66，No.647，PP. 2292-2297.

(16) 坂本恵莉, 永田周豊, 青柳誠司, “RRT を用いた双腕ロボットの衝突回避軌道の生成”,

2008 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2008), PP. 783-784.

(17) 小菅一弘，吉田英博，福田敏男，蟹谷清，酒井勝，“双腕マニピュレータによる薄板のマニピュレーション”，日本機械学会論文集（C 編），(1995), Vol.61，No.591，PP. 4365-4371.

(18) 原田宗雄，青村茂，“双腕ロボットの掴み換え動作計画”， 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2008), pp. 995-996.

(19) 天野新吾，野波健蔵，石井源一，“双腕ロボットの MBD に基づくモデリングとスライディングモード制御”, 第 50 回自動制御連合講演会, (1995), No.07-225, PP. 963-967.

(20) 平田泰久，久米洋平，沢田拓郎，王志東，小菅一弘，“ロボット間の幾何学的関係を必要としない複数移動マニピュレータによる単一物体のハンドリング”，日本ロボット学会誌，(2005), Vol.23，No.1，pp. 139-146.

(21) 井上貴浩，平井慎一，“ソフトフィンガー型最小自由度ハンドを用いた把持・操り動作における安定把持効果”，計測自動制御学会論文集, (2007), Vol.43, No.2, pp. 135-144.

(22) 古川知成，李家仁，M.W.M.G・ディサナヤカ，“冗長双腕マニュピレータ系の準最短時間軌道計画”，日本ロボット学会誌，(1995), Vol.13，No.4，pp. 532-537.

(23) 笠井茂，松崎謙司，“汎用多軸アームと動作経路の自動生成手法”， 東芝レビュー，(2009), Vol.64，No.1，pp. 56-996.

(24) 松下哲也，沖忠洋，松原厚，“テーパーコーン DBB 測定によるテーブルチルト型 5 軸制御工作機械の幾何誤差同定”, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2008), PP. 11-12.

(25) 吉本堅一，松下修己，“Mathematic で学ぶ振動とダイナミクスの理論”森北出版株式会社，PP. 153-161.

(26) 東森充，内海圭祐，大本康隆，金子真，“ピザ職人のハンドリングメカニズムに着目した動的操り” 日本機械学会論文集（C 編），(2008), Vol.74，No.743，PP. 1825-1833.

(27) 山本逸郎，古川由美子，“斜面を転がる球の運動の物理学的考察”弘前大学教育学部紀要，(2006), No.96，PP. 27-40.

(28) 阿部龍蔵，“力学”サイエンス社，PP. 114-135.

(30) Wei WU, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, “Controlling a Working Plate with New Industrial Dual-arm Robots,” *Proceedings of International Symposium on Flexible Automation 2010*, (2010) , JPS-2497, pp.1-4.

(31) 中川昌夫，松下哲也，梨木政行，垣野義昭，井原之敏，”Hexapod 型パラレルメカニズム工作機械の精度向上に関する研究（第 1 報）重力の影響の少ない条件下での精度キャリブレーション”，精密工学会誌，(2001) , Vol.67，No.8，pp.1333-1337.

(32) Wei WU, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, “Motion Control of Rolling Ball by Operating the Working Plate with a Dual-arm Robot,” *International Journal of Automation Technology*, (2012) , Vol.6，No.1, pp.75-83

(33) 垣野義昭，井原之敏，林書鼎，羽山定治，河上邦治，濱村実，”交差格子スケールを用いた超精密 NC 工作機械の運動精度の測定と加工精度の改善”，精密工学会誌，(1996) , Vol.62，No.11，pp.1612-1616.

(34) 井原之敏，田中和也，“多軸工作機械での円錐台加工試験に対応したボールバー測定法（第 1 法）主軸旋回型 5 軸 MC でのボールバー測定と実加工との比較”，精密工学会誌，Vol.71，No.12，(2005) ,pp.1553-1557.

(35) 呉魏，廣垣俊樹，青山栄一，“ボールの転がり運動に着目した双腕ロボットのプレート 2 軸旋回運動制御の運動誤差の考察とその改善手法”，日本機械学会論文集 C 編，(2012), Vol.78, No.785，pp.292-304.

(36) 呉魏，廣垣俊樹，青山栄一，“ボールの転がり運動軌跡を用いた作業プレートの 2 軸旋回運動制御の運動誤差測定とその感度に関する研究”，日本機械学会論文集 C 編，(2012), Vol.78, No.793，pp. 3317-3330.

(37) W. Wu, T. Hirogaki and E. Aoyama, “Investigation of Synchronous Accuracy of Dual Arm Motion of Industrial Robot,” *Journal of Key Engineering Materials*, (2012), Vol.516, PP.234-239.

(38) 石川義雄，須田稔，”転がり摩擦の基礎的研究-表面粗さ形状による摩擦力の変動”，精密機械，(1979), Vol.45，No.5 , pp.49-54.

(39) 渡辺彬，“摩擦の基礎”パワー社, (1979), pp.72-73.

(40) 呉魏，廣垣俊樹，青山栄一，“各種ボールの転がり運動軌跡を用いた作業プレートの 2 軸旋回運動制御の運動誤差測定とその感度に関する研究”，同志社大学理工学研究報告，(2013), Vol.54, No.1，pp. 7-15.

(41) M. D. Hersey, “Rolling Friction, □—Historical Introduction,” *Journal of American Society of Mechanical Engineering*, Ser. F，(1969), Vol.91, No.2, pp.260-263.

(42) M. D. Hersey, “Rolling Friction, □—Cast-Iron Car Wheels,” *Journal of American Society of Mechanical Engineering*, Ser. F，(1969), Vol.91 No.2, pp.264-268.

(43) M. D. Hersey, “Rolling Friction, □—Review of Later Investigation,” *Journal of American Society of Mechanical Engineering*, Ser. F，(1969), Vol.91, No.2, pp.269-275.

(44) 青山茂，植木智大，小柴辰久，“双腕ロボットによる板金曲げ加工における持ち替え動作に関する研究”，精密工学会誌，(2012), Vol.78, No.6, pp.511-516.

(45) 寺田英嗣，輻形和幸，“風呂敷包み作業マルチロボットシステムの運動計画法”，精密工学会誌，(2010) , Vol.76, No.5, pp.546-551.

(46) 前田雄介，相山康道，新井民夫，“ロボットによる接触作業における内力の解析”，精密工学会誌，(2001), Vol.67, No.12, pp.1996-1999.

(47) 相山康道，稲葉雅幸，井上博允，“グラスプレス・マニュピュレーションの研究（操作形態の分類とピボット操作の実現”，日本ロボット学会誌，(1996)，Vol.14，No.1, pp.114-121.

(48) 中島明，長瀬賢二，早川義一，“転がり量に制限を有する平面を転がる球の接触点の制御”，計測自動制御学会論文集，(2004), Vol.40, No.11, pp.1088-1097.

(49) S. Awtar et al., “Mechatronic design of a ball-on-plate balancing system”, *Mechatronics,* (2002), Vol.12, No. 2, pp. 217-228.

(50) Jong Hyeon Park and Young Jong Lee, “Robust visual servoing for motion control of the ball on a plate, ” *Mechatronics*, *,* (2002), Vol.13, No. 7, pp. 723-738.

(51) 江沢洋，“フーリエ解析”朝倉書店 (2009), pp.63-72.

(52) 呉魏，木下俊，廣垣俊樹，青山栄一，“双腕ロボットによるプレート操り制御におけるプレート支持位置の影響”2013 年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp137-138.

(53) 呉魏，木下俊，廣垣俊樹，青山栄一，“産業用双腕ロボットの各種姿勢によるプレート 2 軸旋回運動制御の運動誤差とプレート上のボールの転がり運動の考察” 日本機械学会論文集 C 編，(投稿中).

謝　辞

同志社大学理工学部機械システム工学科教授　廣垣　俊樹　博士には，本研究の遂行に対し多大な御指導ならびに御鞭撻を賜りました．心から厚く感謝申し上げます．

本研究を遂行するにあたり，同志社大学理工学部エネルギー機械工学科教授　青山　栄一　博士より御懇篤なるご指導，御鞭撻を賜りました．ここに深甚なる謝意を表します．

本論文をご精読いただき有用なコメントを頂きました同志社大学理工学部機械システム工学科教授 辻内　伸好　博士に厚く御礼申し上げます．

本研究および本論文完成にあたり，惜しみない御助言および激励頂きました同志社大学理工学部エネルギー機械工学科教授　小泉　孝之　博士，高岡　正憲　博士に厚く御礼申し上げます．

本研究を行うにあたり，実験データなどの取得など多方面にわたりご協力，御助言を賜りました同志社大学大学院生の木下　俊からの絶大なるご協力を頂戴いたしました．心から感謝致します．

本研究および本論文完成にあたり，惜しみない御助言，御協力および激励頂きました生産システムデザイン研究室の皆様に厚く御礼申し上げます．

本研究を遂行するにあたり，常に温かく見守って下さいました両親と妻に心から感謝致します．

最後に，本研究は以上の方々は勿論のこと，他の数多くの方々の御指導，御協力のもとに完成されたものであることを付記すると共に，ここに謹んで御礼申し上げます．

2013 年 11 月 18 日

呉　魏