

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	手先の周期運動を利用した直列ロボットの誤差感度に基づく機構パラ ータ同定と制御
Title(English)	
著者(和文)	小池武
Author(English)	Takeshi Koike
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12493号, 授与年月日:2023年6月30日, 学位の種別:課程博士, 審査員:武田 行生,岩附 信行,山浦 弘,岡田 昌史,土方 亘
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12493号, Conferred date:2023/6/30, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

令和5年度
工学院 機械系 機械コース 博士論文

手先の周期運動を利用した
直列ロボットの誤差感度に基づく
機構パラータ同定と制御

指導教員 岡田 昌史 教授
土方 亘 准教授

東京工業大学 工学院
機械系 機械コース
小池 武

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	ロボットの周期運動における手先精度改善に関する従来研究	5
1.2.1	クーロン摩擦補償に関する従来研究	5
1.2.2	物理パラメータ同定に関する従来研究	6
1.2.3	ロボットの機体差低減に関する従来研究	7
1.3	本研究の目的と構成	8
第 2 章	マニピュレータの運動学と運動方程式	11
2.1	概要	11
2.2	関節原点誤差と手先誤差の関係	11
2.3	動力学モデルと運動方程式	12
第 3 章	誤差解析に基づく摩擦補償のためのフィードフォワード制御	20
3.1	はじめに	20
3.2	ロボットの動力学モデル	21
3.2.1	クーロン摩擦を考慮した平面 3 リンクマニピュレータの運動方程式	21
3.2.2	目標軌道とコントローラ	22
3.3	クーロン摩擦による手先誤差の推定	23
3.3.1	感度に基づく誤差解析 [36]	23
3.3.2	目的動作に固有な誤差の方向性	26
3.4	フィードフォワードトルク的设计	27
3.5	繰り返し計算による関節角誤差推定精度向上	28
3.6	実験検証	31
3.6.1	実験装置の構成	31
3.6.2	実験結果と考察	32
3.7	おわりに	37
第 4 章	運動の感度解析に基づくパラメータの確率的同定	38
4.1	はじめに	38
4.2	パラメータの同定手法	39



4.2.1	動力学モデルと運動方程式	39
4.2.2	最小二乗法による同定	39
4.2.3	パラメータの確率的な同定	40
4.3	パラメータに関する感度解析	41
4.3.1	周期運動の目標軌道	41
4.3.2	周期的な運動における動的感度解析	41
4.3.3	力のつり合いを利用した静的感度解析	43
4.3.4	フィードフォワードトルクの感度解析	43
4.4	感度に基づくパラメータの同定	44
4.5	実験検証	45
4.5.1	実験装置の構成	45
4.5.2	検証動作	46
4.5.3	パラメータの同定	46
4.5.4	実験結果および考察	47
4.6	おわりに	52
第 5 章	独立画像計測による関節角度原点誤差の高精度同定	53
5.1	はじめに	53
5.2	関節角度原点誤差に対する手先誤差感度解析	54
5.2.1	問題設定	54
5.2.2	関節角度原点誤差と手先誤差の関係	55
5.2.3	関節角度原点誤差に対する手先誤差感度	56
5.3	関節角度原点誤差が拡大する軌道の設計と測定方法	57
5.3.1	関節角度原点誤差が拡大される楕円上の点	57
5.3.2	計測用の手先誤差を拡大する軌道の算出	58
5.3.3	撮影タイミングずれを考慮した関節角度原点誤差同定	61
5.4	実験検証	62
5.4.1	実験装置の構成	62
5.4.2	実験手法	63
5.4.3	実験結果と考察	63
5.4.4	3 次元 6 リンクマニピュレータへの拡張の検討	66
5.5	おわりに	67
第 6 章	結論	68
参考文献		71
		71
研究発表		76

発表論文	76
口頭発表	76
謝辞	77
付録 A 摩擦係数の同定	78



図目次

1.1	Number of metal welding and fusing employees in Japan [3][4].	1
1.2	Trends in average annual wages [5].	2
1.3	Arc welding robots used in the manufacture of construction machinery, i.e., hydraulic excavators. [7].	3
1.4	Weaving motion in arc welding.	3
1.5	Arc sensor device setting.	4
1.6	Conceptual diagram of arc sensor and negative effects of vertical movement errors.	4
2.1	(a) Kinematic model of a 3-link planar manipulator and (b) definition of joint origin error and tip error.	11
2.2	Dynamic model of planar 3-link manipulator.	13
3.1	Concept of smooth FF torque to reduce Coulomb friction.	20
3.2	Model of a planar 3-link manipulator and its motion.	22
3.3	Conceptual figure of calculating friction force as a continuous value.	29
3.4	Feedforward torque to reduce Coulomb friction.	30
3.5	Configuration of the experimental robot.	31
3.6	Results of friction compensation experiments.	32
3.7	Results using feedforward compensating torque to reduce errors in the y- and partially in the x-direction.	34
3.8	Results using rectangular feedforward torque that simply cancels the Coulomb friction and the proposed method.	35
3.9	Amplitude error medians and variations.	36
4.1	Concept of parameter identification based on sensitivity.	41
4.2	3-link planar manipulator used in the experiment.	45
4.3	Robot range of motion and the workspace where experiments were conducted.	46
4.4	Weaving motion trajectory.	49
4.5	Weaving motion error trajectory.	49
4.6	x-directional error map.	50
4.7	y-directional error map.	50

4.8	Weaving both ends posture at $(x^r, y^r) = (525 \text{ mm}, 250 \text{ mm})$	50
4.9	x -directional error map based on $p_{(425,150)}$	51
4.10	y -directional error map based on $p_{(425,150)}$	52
5.1	Concept of camera external parameter calibration using elliptical paths.	55
5.2	Difference between tool position error appearing in the tangential direction and the normal direction of the reference trajectory.	56
5.3	Calculation of measurement trajectories.	60
5.4	The trajectories of each joint angle moving on the ellipse connecting the three points.	60
5.5	Estimation of angles measured by encoders in line with the timing of camera capture.	61
5.6	Experimental robot and its configuration. A spherical retroreflective marker with a diameter of 9 mm is placed on the robot's tip.	63
5.7	Results of the camera measurements, which are converted into robot coordinates.	64
5.8	Identification errors of $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ and $\Delta\theta_3$	65
5.9	Arrangement of equipment and measurement trajectories when extending to a 3D 6-link manipulator.	66
A.1	Target trajectory for friction coefficient identification	80



表目次

3.1	Experimental robot specifications.	31
3.2	The friction coefficient of an experimental robot by parameter identification.	31
4.1	Minimum set of dynamics parameter identification results using the proposed method.	47
5.1	Camera specifications and video recording conditions.	63
5.2	Offset patterns and identification results of joint angle origin error.	64

第 1 章

序論

1.1 研究背景

世界的に高齢化が急速に進展しており，日本国内でも総人口に占める 65 歳以上の割合である高齢化率は，1950 年の 5.1 % から 2020 年には 9.3 % に上昇し，2060 年には 17.8 % に達すると見込まれている [1]．日本国内では製造業の就業人数は過去 20 年で 157 万人減少し，若年就業者数も 121 万人減少している [2]．図 1.1 は「国勢調査 / 時系列データ / 人口の労働力状態，就業者の産業・職業」および「国勢調査 / 令和 2 年国勢調査 / 抽出詳細集計」より，金属溶接・溶断従業者数の推移をまとめたものであるが，1970 年に 48 万人であった溶接関連の従業者数が，2020 年の調査結果では 16 万人とおおよそ三分の一となっており，溶接にかかわる労働力減少が顕著である．15

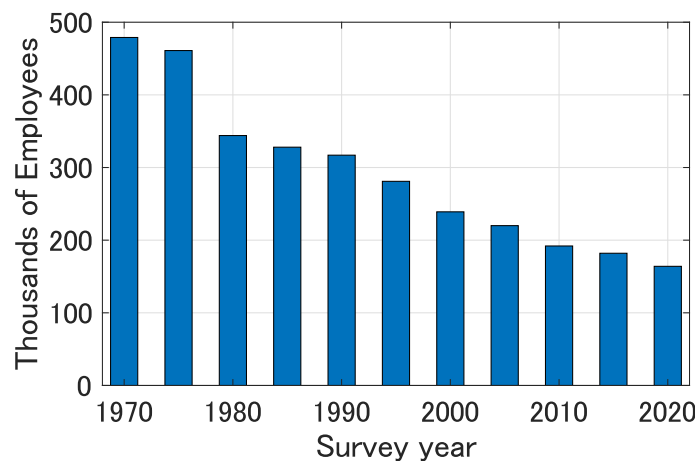


Fig.1.1: Number of metal welding and fusing employees in Japan [3][4].

歳から 64 歳までの生産年齢人口の予測では，2020 年の約 7400 万人が 2050 年には約 5300 万人と三分の二に減少することが予測されており [6]，今後も労働人口の減少は続く想定される．また，国際的には労働コストの上昇も自動化を要求される一因となっている．図 1.2 は OECD による年間平均賃金の各国推移を 2021 年の米国ドルで表したものである．日本以外の各国での平均賃金は近年上昇傾向であり，灰色線で表した OECD 調査国平均も上昇傾向であることがわかる．これら，



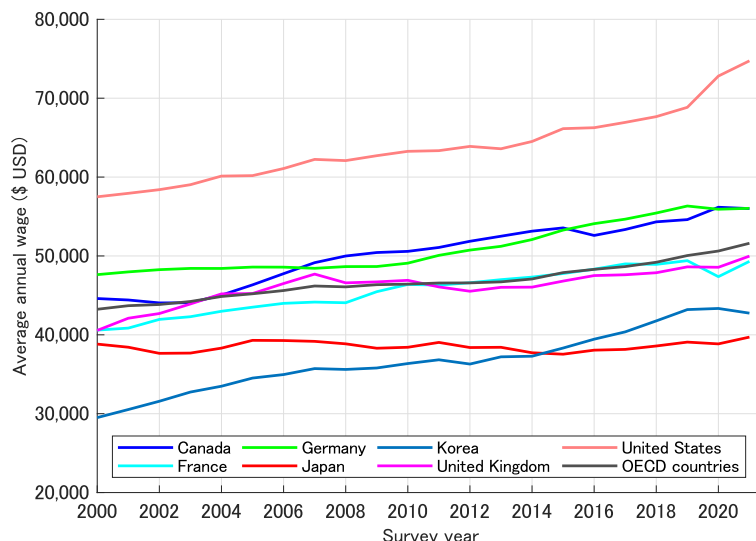


Fig.1.2: Trends in average annual wages [5].

国際的な労働者の平均賃金上昇と特に国内で顕著な人手不足の進行から、溶接作業の自動化が強く求められている。

製造現場の自動化には産業用ロボットが用いられている。産業用ロボットには、直交ロボット、パラレルリンクロボット、スカラロボットなどさまざまな種類があるが、垂直多関節ロボットであるシリアルロボットが代表的である。なかでもアーク溶接ロボットは図 1.3 に示すような建設機械の製造現場をはじめ、高層鉄骨、鉄道車両、造船などの製造現場で利用されているシリアルロボットであり、溶接作業の自動化に貢献している。自動化が進むことにより従業者数の減少が補われるが、本来、アーク溶接は熟練が必要とされる作業であり、ロボットの制御性能を向上させる必要がある。

産業用溶接ロボットの作業軌道設計には移動目標位置を順次ロボットに教示し、これを再生するティーチング・プレイバック方式が用いられる [8]。ティーチング・プレイバック方式のロボットでは、ロボットを誘導した位置を教示点として記録し再生するため、教示点とロボットが移動した位置の差を示す絶対精度よりも、同じ記録した位置に同一方向から繰り返しロボットを移動させたときの位置のばらつきである繰り返し精度が重視される [9][10]。しかし、移動経路を微細に記録することは困難なため、教示点には代表点を選ばれるがアーク溶接では途中経路も重要であることから溶接性能の向上には多くの代表点を教示しなければならない。さらに、アーク溶接ロボットでは溶融金属を幅広く溶着させるためや溶接品質確保のために、ロボット先端に設置された溶接トーチを教示点間の移動中に周期的に揺動させるウィービング動作が用いられる [11]。図 1.4 は溶接対象物に形成された開先部を溶接する際のウィービング動作を表している。溶接進行方向に対し横方向に溶接トーチを周期運動させることによって幅広い溶接ビードを形成する。ウィービング動作はその動きを利用して溶接箇所を追従を行うアークセンサに利用される。図 1.5 はアークセンサの機器構成図である。溶接トーチにはワイヤが送給されており、ウィービングによってトーチが移動する

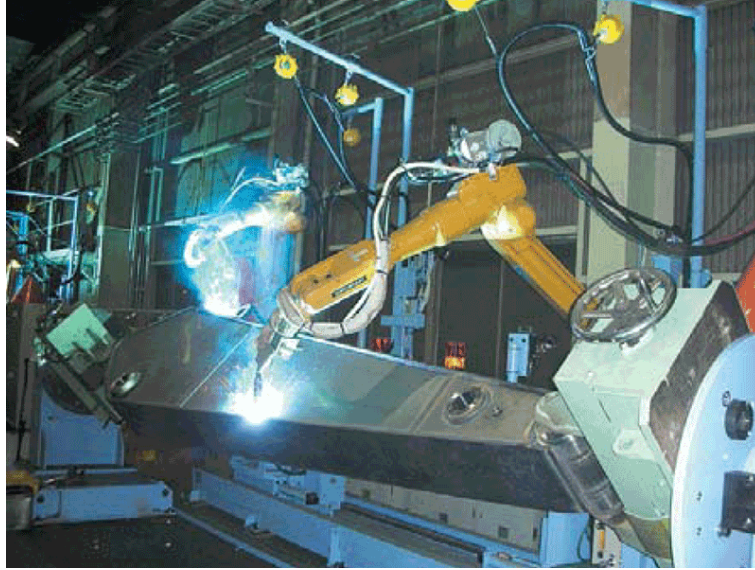


Fig.1.3: Arc welding robots used in the manufacture of construction machinery, i.e., hydraulic excavators. [7]

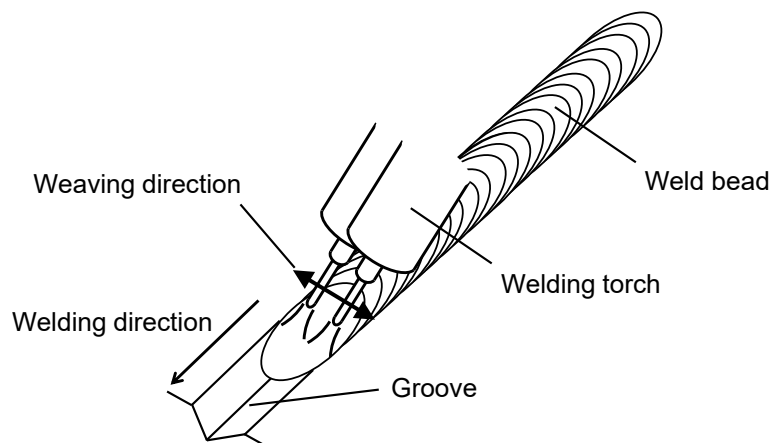


Fig.1.4: Weaving motion in arc welding.

と開先形状に沿ってアーク発生高さが変化する．トーチと溶接母材間には溶接電源が接続されており，電圧を一定に保つ制御が行われるため，トーチ・母材間の距離の変化が電流の変化として計測される．図 1.6(a)(b) はアークセンサによる開先左右追従の概念図である．ウィービングによりトーチが移動するとトーチ直下の開先形状変化に応じた電流が計測される．図 1.6(a) では，ウィービングは開先中央に対し，均等に往復運動を行っている．一方，(b) では，ウィービング中心が右に移動しており，検出された電流の形が変化している．この変化をもとに開先中央を追従することができる [12][13]．しかし，図 1.6(c) のようにウィービング動作においてトーチに意図しない上下動が発生するとこれが外乱となり，アークセンサの性能を低下させる．よって，アークセンサはトーチ高さ変化に大きな影響をうける [14]．

そのため，上下方向の精度向上がアーク溶接ロボット制御において最も重要である [15]．これよ

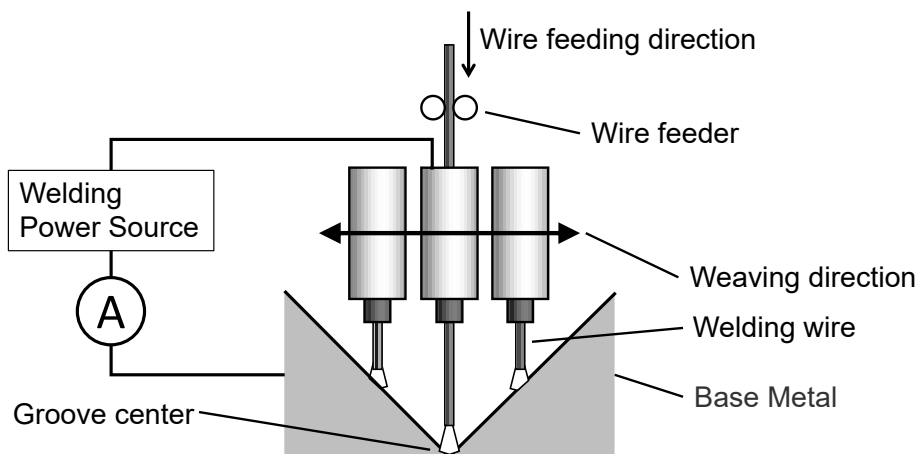


Fig.1.5: Arc sensor device setting.

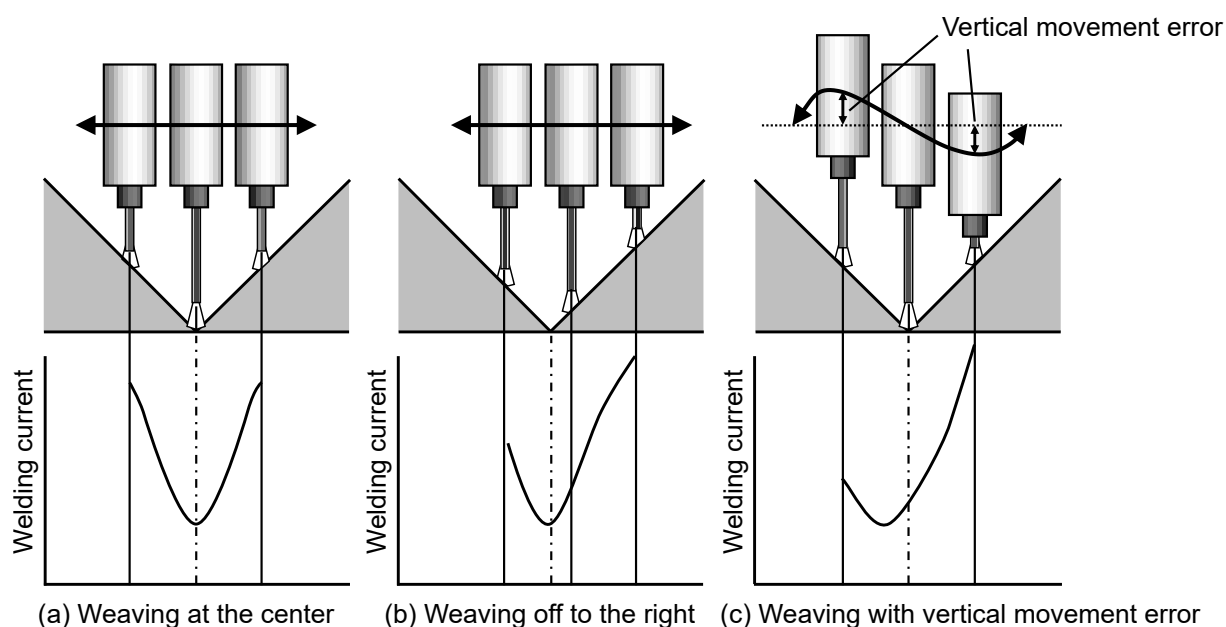


Fig.1.6: Conceptual diagram of arc sensor and negative effects of vertical movement errors.

り、アーク溶接ロボットにおいては、可能な限り上下動誤差を抑える必要があり、約 0.1 mm 以下の精度が必要である。さらに、周期運動の振幅は溶接金属の仕上がり形状に大きく影響を与えるため、指定振幅からの差を低減することも重要である。ロボット先端の位置決め精度に影響を与える大きな要因として、減速機やリンクの弾性、モータドライバの動特性、その他のモデル化されない動特性などが挙げられるが、特にロボットの関節部に用いられる減速機でのクーロン摩擦力は影響が大きい。この影響は補償が難しい。また、ウィービングは、ロボットのサイズに比べて微細な動作であり、ノイズやモデル化誤差の影響を受けやすい [16][17]。そのため、これらの影響を低減する手段が必要である。このような状況では、ロボットアームで粗動を制御し、これに小型のアクチュエータを搭載して微動を制御するマクロ／マイクロ機構 [18][19] が有効であるが、アーク溶接を実施す

る環境は厳しく、機械の故障・メンテナンスの観点からアクチュエータを増やすことは望ましくない。また、溶接トーチ付近に機器が追加されることによるロボット溶接適用箇所減少やアーク溶接ロボットの高価格化も実用上避けるべき項目に含まれる。

また、製造現場でのロボットが故障などにより交換される場合、交換前のロボットと交換後のロボットでは手先位置決めに関連する誤差要素が異なるため、教示点の再現精度が大幅に悪化し、溶接結果にも大きな悪影響を与える。記録した位置の修正を行えば繰り返し位置精度が保障されるが [20]、位置の記録はロボットと溶接対象物との接触を避けるため注意深く行う必要がある [21]。作業対象が大型で位置の記録点数が多いアーク溶接ロボットシステムなどでは位置修正作業に長い時間が必要となるため、早急な復旧等の妨げとなる。このような保守工数を削減するため、ロボットが稼働している現場で利用できる、ロボット機体ごとに異なる誤差要素の影響を低減する手段も必要である [22]。

アーク溶接ロボットにおけるウィービング動作は、ロボットの手先を比較的小さな振幅で周期的に揺動させる運動 [23] として表すことができる。また、上記のように要求されるエンドエフェクタの精度に方向性があることも特徴である。そこで、本研究では直列ロボット（シリアルロボット）の周期運動を対象とし、運動が周期的であるときに誤差も周期的に発生することを利用する。ウィービング運動以外の周期運動とみなせる運動の例としては製造現場でのピックアンドプレイス動作 [24][25] や、歩行運動 [26][27] がある。これらの運動を対象とする場合、誤差が周期的に発生し運動が一定軌道に収束している場合には本研究で提案する手法が適応できる。ピックアンドプレイス動作であれば、対象物を把持する位置と解放する位置がほぼ一定で把持対象物重量などが一定である場合が相当する。また、歩行運動であれば、歩容が一定で歩行速度も変化しない場合である。上記の誤差が周期的に発生することに加えてロボットに要求される精度に方向性があることを利用し、ロボットの周期運動におけるエンドエフェクタである手先精度の向上と手先精度全体に影響する機体差の低減に取り組む。

1.2 ロボットの周期運動における手先精度改善に関する従来研究

1.2.1 クーロン摩擦補償に関する従来研究

ロボットがウィービングのような周期運動を行うとき、その手先精度に影響が大きいクーロン摩擦力の補償には一般にクーロン摩擦を速度の符号関数でモデル化したものを用いる。しかし、この影響をフィードバック制御で補償した場合、速度零近傍でチャタリングを起こすなど望ましくない。一般には、不感帯などを設けてチャタリングを防止するが、その設定はロボット機体、動作の種類や要求される精度に依存した試行錯誤的な繊細さが要求される。一方、フィードフォワードを用いて補償を行う場合、簡易な方法として、目標の運動における速度の正負の入れ換わりにともなう矩形のトルクを入力することが考えられるが、モータや減速機など駆動系への負荷も大きいという、タイミングずれなどの影響により過小補償・過剰補償となりやすい。特にウィービング動作は



何度も速度の正負が切り替わる運動であり、それらの影響により性能が劣化することが予想される。これらの課題に対し、摩擦をより厳密にモデル化するものとしては、二剛体の表面に弾性のある棘を仮定しその平均たわみ量として摩擦をモデル化した LuGre モデル [28] を用い、オブザーバを用いて摩擦補償を行ったもの [29]、並列粘弾性と速度依存粘性からなるモデルに拡張して補償する手法 [30]、転がり摩擦モデルへ拡張して補償するもの [31] が提案されている。これらは摩擦のより精密に表すことにより補償精度を向上させることを目的としたものであるが、摩擦力を表すパラメータが増加し複雑化する課題がある。また、実際に対象運動を行った結果を用いるものとしては、繰り返し制御を用いてフィードフォワードトルクを学習するもの [32]、ニューラルネットワークを用いて学習による摩擦補償を行うコントローラ設計手法も提案されている [33]。しかし、アーク溶接ロボットに適用する場合、実際の溶接作業を生産現場で繰り返し行って計測した結果が必要となるため、その利用は困難であるうえ、特にニューラルネットワークを用いた手法では制御実行時の計算量が増加するという課題もある。また、摩擦力の推定にカルマンフィルタを用いたものや外乱オブザーバを用いたもの [34][35] があるが、推定遅延時間が周期運動に大きな影響を与える。運動の周期性に着目し推定遅延時間を低減した周期外乱オブザーバも提案されている [17] が、着目する周期以外の外乱を増幅する可能性や、制御系設計が複雑化する課題がある。一方、運動の周期性に着目したフィードフォワードトルク設計手法も提案されている [36]。これは運動の周期性を利用し、感度解析に基づいてクーロン摩擦に対してなめらかなフィードフォワード補償を求めるものであるが、シミュレーションでの検討にとどまっているうえ、フィードフォワードトルクを求める際の符号関数の計算における数値的な不安定性の課題があり、特にクーロン摩擦係数が大きい場合には正確な値が得られにくいといった問題点が残る。

1.2.2 物理パラメータ同定に関する従来研究

ロボットの追従制御にはフィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせ用いられる。フィードフォワード制御を構成するためには質量・リンク長などの物理パラメータの同定が必要であるが、その数の多さから個別に同定することは困難である。このため、一般には動力学モデルに必要な動力学パラメータを実験データから最小二乗法により同定を行う。これには、慣性項を対象とし同定する研究 [37] や摩擦係数などを含めた全パラメータを同時に同定する研究 [38][39]、同定に適した動作を決定する研究 [40][41] などが存在する。しかし、実験データにはノイズが含まれることや、ロボットには静止摩擦、リンクの剛性、ギアの剛性などモデル化されない動特性が存在するため、パラメータの真の値は得られない。同定されるパラメータは同定に使用した動作をよく表しているにすぎず、必ずしも目的の動作に適したパラメータになるとは言えない。同定パラメータの誤差を考慮した制御手法も提案されている [43] が、誤差の正確な見積もりは難しい。そのため、制御目的に適したパラメータを同定し、それに基づいたフィードフォワードトルクによる制御で誤差を抑制することが考えられる。

同定するモデルを関節やリンクなどの剛性などを追加して拡張し、非剛体モデルとして拡張する

研究では、位置決め誤差の向上を目的とし、関節剛性、リンク剛性を考慮したもの [44][45]、機構の校正時に重力によるたわみ影響を除去することでパラメータ誤差から重力の影響を分離し、校正精度を向上させたもの [46] がある。また、振動抑制を目的として、2 リンクマニピュレータを対象のリンク上に追加した加速度センサで計測した値を利用し、リンクごとに独立してパラメータの同定が行えるようにして、周波数応答の一致性を改善したもの [47]、手先に追加した加速度センサを利用し、減速機の弾性とモータロータの回転・並行移動を含めたモデルの同定を行いつつ、オブザーバによる状態推定で振動抑制を行ったもの [48] がある。これらの研究はモデルをより詳細なものへ拡張することで制御性能の向上を実現したものであるが、追加するパラメータが増加すればパラメータ同定がより困難になるうえ、モデルが複雑化することによる計算量の増加などの課題があり、場合によってはセンサの追加が必要となるなど、詳細化していくには限界がある。そのため、モデルに含まれない動特性などが残存し、モデル化誤差となることは避けられない。

最小二乗法により周期的な運動を制御目的として同定する場合、目的の動作である周期運動のデータに基づいてパラメータ同定すべきであるが、この動作はパラメータ同定のための PE (Persistently Exciting) 性 [49] を満たしておらず不定の解しか得られない。また、制御に適した同定手法の一つに、 H_∞ 制御の誤差の見積もりを目的とした伝達関数のパラメータを、誤差を含めて同定する手法がある [50]。しかし、伝達関数の係数はロボットの物理パラメータとの一致が難しく、運動方程式の最小動力学パラメータの同定への適用も難しい。一方、モデルはコントローラ設計のための道具であるという観点に立てば、必ずしも対象を正確に表している必要はなく、そこから設計されたコントローラで性能が向上すれば十分である。すなわち、制御性能を大きく左右するパラメータは正確に、そうでないパラメータは粗く同定するといったことも必要であると考えられる。

1.2.3 ロボットの機体差低減に関する従来研究

ロボットの機体差の影響については、ロボットの絶対精度を向上させる機構パラメータのキャリブレーション技術として、手先位置を繰り返し定点に位置決めし、アームの機械誤差とたわみを補正する方法が提案されてきた [51]。しかし、固定位置への位置決め作業回数が多く、より簡便な方法が必要である。

高精度なセンサを利用した機構パラメータのキャリブレーション手法としては、レーザセンサを利用したもの [52][53]、ステレオカメラを利用したもの [54][55] などが提案されているが、作業範囲が限定されることや計測機器が高価であることが課題である [56]。また、観測可能指数を用いてキャリブレーションのための最適な計測姿勢を選択するもの [57]、キャリブレーション対象のパラメータに対する手先誤差感度を平均化する姿勢を選択するもの [52]、機構誤差に対する手先誤差の最大感度を指標として姿勢を選択するもの [58] などが提案されている。しかし、これらは対象ロボットの絶対誤差を高精度なセンサの計測を利用して向上させるものであり、ロボットが実稼働している生産現場での利用は環境の制限から困難である。

計測姿勢による特定の誤差が大きくなることを考慮した研究としては、パラレルマニピュレータ



の受動関節のがたつきを検出する軌道設計手法を提案したもの [59] がある。これは特定の関節に対しその関節のがたによるトルク変動が特に大きく現れ、他の関節のがたの影響が抑えられる軌道を用いることで、効率的にがたが発生している関節を特定するものである。ここで、計測軌道は関節毎に設計されており、関節数の動作と計測を軌道を変えて行う必要がある。製造現場で計測を行う場合、計測中は生産を停止する必要があるため、より短時間に計測できる手法が必要である。

一方、ロボットを同一機種 of 別個体に交換した場合に限定すれば、関節部・アーム部の剛性・リンク長さ誤差などの機械的誤差はほぼ同等で、その差は極めて小さいと想定される。しかし、組立時に個体ごとに調整される関節原点誤差は個体差として残り、手先ずれへの影響は小さくない。産業用ロボットにおいて、関節原点誤差はロボットメーカーで調整されて出荷されるものの、一定の合格範囲内に調整されており完全に零にはされていない。そのため、個体差として手先ずれへの大きな影響を与えるのは関節原点誤差と考えられる [60][61]。ロボットを床面や床面に設置された架台に固定する際の据え付け誤差の影響も考えられるが、ロボットを入れ替えた際を想定すると、設置面は機械加工されていると想定されるため、据え付け誤差の変化が大きく発生するのは水平面内の平行移動ずれと回転ずれと考えられ、これらはロボットの関節原点誤差が十分に小さければ、手先位置の計測から容易に補正可能であるため、関節原点誤差の測定が重要となる。関節原点誤差に対象を限定すれば、測定機器の精密な設置が行うのが困難な製造現場においては民生用カメラやスマートフォンなど比較的安価な撮影機材を利用したロボットの個体差低減を行うことが期待できる。

1.3 本研究の目的と構成

本論文では、これらのロボットの手先精度改善の課題に対し、感度を用いた解析に基づいた解決手法を提案する。感度は変数の微小変化に対する評価値への影響の大きさであり、評価値を $f(x)$ としたとき、変数 x の $f(x)$ に対する感度 S は

$$S = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (1.1)$$

で表される。感度を考慮することで、システムやモデルの状態やパラメータが変化した場合に、その影響を推定することができる。感度は、さまざまな分野で活用されており、経済学 [62][63][64]、医学 [65][66] での利用事例がある。工学での利用例では、井上ら [67] は試行錯誤的な設計変更では設計者の手間を増やすだけで効率のよい最適設計は行なえないため、最適化を図るためにどの設計パラメータを変更するかを表す指標として感度を利用しロボットの最適設計を行っている。また、類似する事例として、機構パラメータと最大位置決め誤差の関係からパラメータ構成に効果的な姿勢を計算し、校正精度を向上させているもの [58] がある。感度が時系列的に変動する動的感度を用いた事例としては、梁や門型フレームなどの構造物が時系列的变化する外力が加わったときの動的感度を分析した事例 [68] や、原子炉配管について地震弾塑性応答の感度解析を行ったもの [69]、設計変数の変動をそのダイナミクスに基づいて確認するための効率的なツールとして、感度解析を使用することを提案し、パンタグラフの動的特性改善に用いたもの [70] などがある。ロボットを対象

にしたものでは、ロボットの一般化座標，一般化速度，一般化加速度を与えた場合の動的パラメータの一般化力に対する動的感度の算出方法を提案したもの [71] などがあるが，感度の計算方法を提案するにとどまっている．一方，岡田ら [72] は，投擲ロボットを対象に投擲運動を指定した場合の，動力学最小パラメータの投擲物の着地点に対する感度を考慮することで，投擲動作を最適化し，投擲位置のばらつきを低減している．この手法は先にパラメータによる誤差を感度として求め，感度が小さくなる運動を求めるものである．この運動に関する動的感度を利用する方法は，産業用ロボット特にアーク溶接ロボットの固有タスクであるウィービングのように運動が先に決定されている動作においては，ウィービング動作に対する手先位置決めに関する動的な感度を利用し，外乱やパラメータ誤差の影響を低減することに利用することが考えられる．

そこで，本論文では 2 章で以降の章で利用するために直列ロボットの運動学モデル・動力学モデルを定義し，関節角度誤差と手先誤差の関係，最小動力学パラメータの関係を示す．

3 章においては，アーク溶接ロボットで重要なウィービング運動を表した周期運動に対する摩擦力の感度を利用した，摩擦補償フィードフォワード設計手法を提案する．変数として摩擦力を考え，評価値としてロボット手先の位置決め誤差の大きさを考えたとき，摩擦力の手先誤差に対する感度を求めることができれば，摩擦力の手先誤差への影響の大きさを評価できるため，この影響を低減することに利用できる．また，評価値としてロボット手先位置の誤差を考えた場合，感度を指標として用いることで，誤差の発生方向など対象タスク特有の条件を考慮しやすいという利点もある．

4 章では，周期運動に対するマニピュレータの最小力学パラメータの感度を用いた，パラメータの確率的同定手法を提案する．最小動力学パラメータに関連した周期運動の動的感度を考慮し，それを最小化するようにパラメータ同定を行うことで，フィードフォワード制御で用いる機構パラメータの手先誤差に対する感度を検討することができ，パラメータのうち，手先誤差感度の高い重要なパラメータを精密に同定し，感度の低い重要でないパラメータは粗く同定するなど，重要度に応じた同定が可能となる．

5 章では，運動の感度を考慮する方法を応用し，関節角度原点誤差の手先位置に対する感度を考え，それを最大化する姿勢を考慮することで，簡易な計測方法で精密に関節角度原点誤差を同定する手法を提案する．特定の関節の角度原点誤差が精密に同定できる点を求め楕円上に配置しロボットの手先が軌道上を動作した位置を多数利用することで，短時間で簡易に計測できるように同定が行えるようにする．その際，軌道の法線方向に誤差が大きくなるように，法線方向感度を考慮することで軌道の設計を行う．

6 章では全体のまとめを行う．3 章から 5 章での成果をまとめるとともに，アーク溶接ロボットへの応用や今後の展望について述べる．



以下に本論文で用いる記号を定義する.

$\mathbf{A}^\#$	: A の Moore-Penrose 型擬似逆行列
$\mathbf{A}^\perp$	: A の零空間基底ベクトルから成る行列
$\mathbf{I}_n$	: $n \times n$ の単位行列
$\text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_n)$	: $a_1 \sim a_n$ を対角要素とする対角行列
$\text{sgn}(a)$	: a を引数とする符号関数

第2章

マニピュレータの運動学と運動方程式

2.1 概要

本章では，次章以降で提案手法の検証に用いる平面3リンクマニピュレータの運動学モデルと動力学モデルを導出する．特に2.2節では運動学に基づいて関節原点誤差と手先位置誤差の関係を導き，これは3章と5章で用いる．2.3節では運動方程式と最小動力学パラメータを求め，これは3章と4章で用いる．

2.2 関節原点誤差と手先誤差の関係

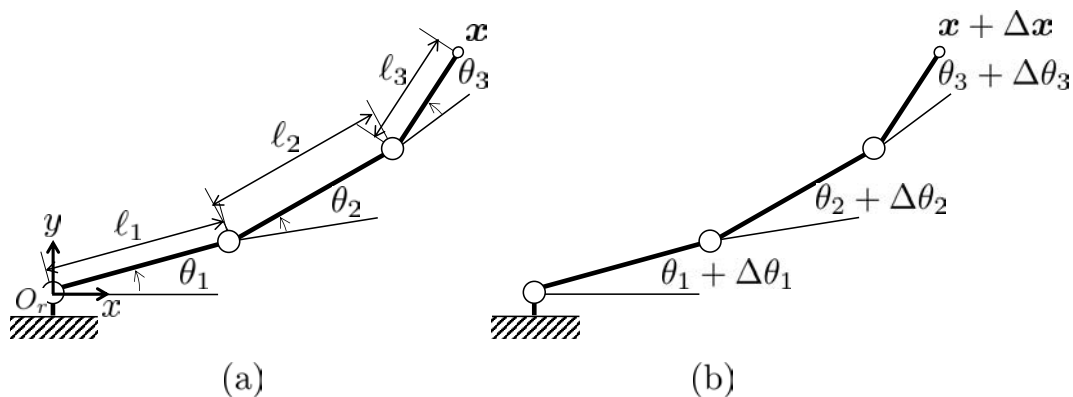


Fig.2.1: (a) Kinematic model of a 3-link planar manipulator and (b) definition of joint origin error and tip error.

平面3リンクマニピュレータの関節角度と手先位置の関係を図2.1に示す．各関節の関節角度を θ_i とすると，関節角度と手先位置 x の関係は

$$x = \begin{bmatrix} \ell_1 C_1 + \ell_2 C_{12} + \ell_3 C_{123} \\ \ell_1 S_1 + \ell_2 S_{12} + \ell_3 S_{123} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

で表される。ただし,

$$S_1 = \sin(\theta_1), \quad S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2), \quad S_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.2)$$

$$C_1 = \cos(\theta_1), \quad C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2), \quad C_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.3)$$

とする。式 (2.1) の両辺を時間微分すると,

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -\ell_1 S_1 - \ell_2 S_{12} - \ell_3 S_{123} & -\ell_2 S_{12} - \ell_3 S_{123} & -\ell_3 S_{123} \\ \ell_1 C_1 + \ell_2 C_{12} + \ell_3 C_{123} & \ell_2 C_{12} + \ell_3 C_{123} & \ell_3 C_{123} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

となり, ヤコビ行列 $\mathbf{J}$ が得られる。

図 2.1(b) に表すように θ_i が関節原点誤差 $\Delta\theta_i$ を含んでおり, 手先に $\Delta\mathbf{x}$ の誤差を生じさせているとすると, $\Delta\theta_i$ と手先ずれ $\Delta\mathbf{x}$ の関係は式 (2.5) の $\mathbf{J}$ を用いて,

$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

で表すことができる。また, y 方向の手先ずれのみを考慮する場合は,

$$\mathbf{J}_y = \begin{bmatrix} \ell_1 C_1 + \ell_2 C_{12} + \ell_3 C_{123} & \ell_2 C_{12} + \ell_3 C_{123} & \ell_3 C_{123} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

を用いて,

$$\Delta y = \mathbf{J}_y \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

と表すことができる。

2.3 動力学モデルと運動方程式

次に平面 3 リンクマニピュレータの動力学モデルを図 2.2 に示す。ただし, i を関節・リンク番号とし,

- θ_i : 関節角度 (相対角)
 m_i : リンク質量
 (x_{gi}, y_{gi}) : 重心位置
 I_i : リンク慣性モーメント
 ℓ_{gi} : 重心までの長さ
 g : 重力加速度
 α_i : 重心となす角
 τ_i : 関節トルク
 d_i : 粘性摩擦係数
 μ_i : クーロン摩擦係数

を表す. このモデルをもとにラグランジュの運動方程式を導出する. なお, 実機の実データ取得・ロボットへの指令は相対角を用いるが, 運動方程式の導出では絶対角の方が簡便なため,

$$\Theta_1 = \theta_1 \quad (2.9)$$

$$\Theta_2 = \theta_1 + \theta_2 \quad (2.10)$$

$$\Theta_3 = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (2.11)$$

として絶対角で運動方程式を導出し, 相対角に変換を行う.

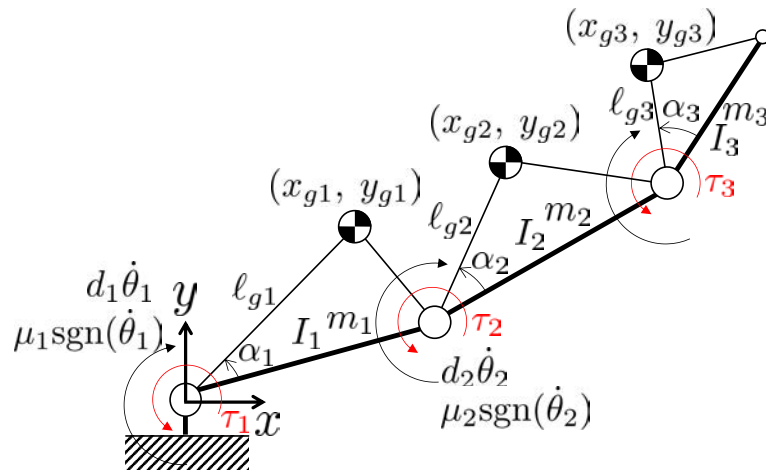


Fig.2.2: Dynamic model of planar 3-link manipulator.

ロボットの運動エネルギーは,

$$E_{K1} = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_{g1}^2 + \frac{1}{2}m_1\dot{y}_{g1}^2 + \frac{1}{2}I_1\dot{\Theta}_1^2 \quad (2.12)$$

$$E_{K2} = \frac{1}{2}m_2\dot{x}_{g2}^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_{g2}^2 + \frac{1}{2}I_2\dot{\Theta}_2^2 \quad (2.13)$$

$$E_{K3} = \frac{1}{2}m_3\dot{x}_{g3}^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{y}_{g3}^2 + \frac{1}{2}I_3\dot{\Theta}_3^2 \quad (2.14)$$

$$E_K = E_{K1} + E_{K2} + E_{K3} \quad (2.15)$$

と表される. ここで重心位置の幾何学関係は

$$x_{g1} = \ell_{g1} \cos(\Theta_1 + \alpha_1) \quad (2.16)$$

$$y_{g1} = \ell_{g1} \sin(\Theta_1 + \alpha_1) \quad (2.17)$$

$$x_{g2} = \ell_1 \cos \Theta_1 + \ell_{g2} \cos(\Theta_2 + \alpha_2) \quad (2.18)$$

$$y_{g2} = \ell_1 \sin \Theta_1 + \ell_{g2} \sin(\Theta_2 + \alpha_2) \quad (2.19)$$

$$x_{g3} = \ell_1 \cos \Theta_1 + \ell_2 \cos \Theta_2 + \ell_{g3} \cos(\Theta_3 + \alpha_3) \quad (2.20)$$

$$y_{g3} = \ell_1 \sin \Theta_1 + \ell_2 \sin \Theta_2 + \ell_{g3} \sin(\Theta_3 + \alpha_3) \quad (2.21)$$

となり, 式 (2.16)~(2.21) の両辺を時間微分し, 式 (2.12)~(2.14) に代入すると,

$$E_{K1} = \frac{1}{2}(m_1\ell_{g1}^2 + I_1)\dot{\Theta}_1^2 \quad (2.22)$$

$$E_{K2} = \frac{1}{2} \left\{ m_2\ell_1^2\dot{\Theta}_1^2 + (m_2\ell_{g2}^2 + I_2)\dot{\Theta}_2^2 + 2m_2\ell_1\ell_{g2}\dot{\Theta}_1\dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1 + \alpha_2) \right\} \quad (2.23)$$

$$E_{K3} = \frac{1}{2} \left\{ m_3\ell_1^2\dot{\Theta}_1^2 + m_3\ell_2^2\dot{\Theta}_2^2 + (m_3\ell_{g3}^2 + I_3)\dot{\Theta}_3^2 + 2m_3\ell_1\ell_2\dot{\Theta}_1\dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1) \right. \\ \left. + 2m_3\ell_1\ell_{g3}\dot{\Theta}_1\dot{\Theta}_3 \cos(\Theta_3 - \Theta_1 + \alpha_3) + 2m_3\ell_2\ell_{g3}\dot{\Theta}_2\dot{\Theta}_3 \cos(\Theta_3 - \Theta_2 + \alpha_3) \right\} \quad (2.24)$$

となる. また, ポテンシャルエネルギーは,

$$E_{U1} = m_1g\ell_{g1} \sin(\Theta_1 + \alpha_1) \quad (2.25)$$

$$E_{U2} = m_2g \{ \ell_1 \sin \Theta_1 + \ell_{g2} \sin(\Theta_2 + \alpha_2) \} \quad (2.26)$$

$$E_{U3} = m_3g \{ \ell_1 \sin \Theta_1 + \ell_2 \sin \Theta_2 + \ell_{g3} \sin(\Theta_3 + \alpha_3) \} \quad (2.27)$$

$$E_U = E_{U1} + E_{U2} + E_{U3} \quad (2.28)$$

と表され, ラグランジアンは,

$$L = E_K - E_U \quad (2.29)$$

と表される. これらから, ラグランジュの運動方程式を求める. なお, ここでは第 1 リンクについての運動方程式の導出を示し, 第 2, 3 リンクについては結果のみを示す. 第 1 リンクの運動方程式は, 一般化トルクを f_1 として,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\Theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \Theta_1} = f_1 \quad (2.30)$$

であり，ラグランジアンそれぞれの微分は，

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\Theta}_1} &= (m_1 \ell_{g1}^2 + I_1) \dot{\Theta}_1 + m_2 \ell_1^2 \dot{\Theta}_1 + m_2 \ell_1 \ell_{g2} \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1 + \alpha_2) \\ &\quad + m_3 \ell_1^2 \dot{\Theta}_1 + m_3 \ell_1 \ell_2 \dot{\Theta}_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1) + m_3 \ell_1 \ell_{g3} \dot{\Theta}_3 \cos(\Theta_3 - \Theta_1 + \alpha_3) \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} &= (m_1 \ell_{g1}^2 + m_2 \ell_1^2 + m_3 \ell_1^2 + I_1) \dot{\Theta}_1 + \{m_2 \ell_1 \ell_{g2} \cos(\Theta_2 - \Theta_1 + \alpha_2) \\ &\quad + m_3 \ell_1 \ell_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1)\} \dot{\Theta}_2 + m_3 \ell_1 \ell_{g3} \dot{\Theta}_3 \cos(\Theta_3 - \Theta_1 + \alpha_3) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\Theta}_1} \right) &= (m_1 \ell_{g1}^2 + m_2 \ell_1^2 + m_3 \ell_1^2 + I_1) \ddot{\Theta}_1 \\ &\quad + \{m_2 \ell_1 \ell_{g2} \cos(\Theta_2 - \Theta_1 + \alpha_2) + m_3 \ell_1 \ell_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1)\} \ddot{\Theta}_2 \\ &\quad - m_2 \ell_1 \ell_{g2} (\dot{\Theta}_2^2 - \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2) \sin(\Theta_2 - \Theta_1 + \alpha_2) \\ &\quad - m_3 \ell_1 \ell_2 (\dot{\Theta}_2^2 - \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2) \sin(\Theta_2 - \Theta_1) \\ &\quad + m_3 \ell_1 \ell_{g3} \ddot{\Theta}_3 \cos(\Theta_3 - \Theta_1 + \alpha_3) - m_3 \ell_1 \ell_{g3} (\dot{\Theta}_3^2 - \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_3) \sin(\Theta_3 - \Theta_1 + \alpha_3) \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \Theta_1} &= m_2 \ell_1 \ell_{g2} \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \sin(\Theta_2 - \Theta_1 + \alpha_2) + m_3 \ell_1 \ell_2 \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_2 \sin(\Theta_2 - \Theta_1) \\ &\quad + m_3 \ell_1 \ell_{g3} \dot{\Theta}_1 \dot{\Theta}_3 \sin(\Theta_3 - \Theta_1 + \alpha_3) \\ &\quad - m_1 g \ell_{g1} \cos(\Theta_1 + \alpha_1) - m_2 g \ell_1 \cos \Theta_1 - m_3 g \ell_1 \cos \Theta_1 \end{aligned} \quad (2.33)$$

であるから，式 (2.30) の左辺は，

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\Theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \Theta_1} &= (m_1 \ell_{g1}^2 + m_2 \ell_1^2 + m_3 \ell_1^2 + I_1) \ddot{\Theta}_1 \\ &\quad + \{m_2 \ell_1 \ell_{g2} \cos(\Theta_2 - \Theta_1 + \alpha_2) + m_3 \ell_1 \ell_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1)\} \ddot{\Theta}_2 \\ &\quad + m_3 \ell_1 \ell_{g3} \cos(\Theta_3 - \Theta_1 + \alpha_3) \ddot{\Theta}_3 - m_2 \ell_1 \ell_{g2} \dot{\Theta}_2^2 \sin(\Theta_2 - \Theta_1 + \alpha_2) \\ &\quad - m_3 \ell_1 \ell_2 \dot{\Theta}_2^2 \sin(\Theta_2 - \Theta_1) - m_3 \ell_1 \ell_{g3} \dot{\Theta}_3^2 \sin(\Theta_3 - \Theta_1 + \alpha_3) \\ &\quad + m_1 g \ell_{g1} \cos(\Theta_1 + \alpha_1) + m_2 g \ell_1 \cos \Theta_1 + m_3 g \ell_1 \cos \Theta_1 \\ &= (m_1 \ell_{g1}^2 + m_2 \ell_1^2 + m_3 \ell_1^2 + I_1) \ddot{\Theta}_1 \\ &\quad + (m_2 \ell_{g2} \cos \alpha_2 + m_3 \ell_2) \cos(\Theta_2 - \Theta_1) \ell_1 \ddot{\Theta}_2 \\ &\quad - m_2 \ell_{g2} \sin \alpha_2 \sin(\Theta_2 - \Theta_1) \ell_1 \ddot{\Theta}_2 \\ &\quad + m_3 \ell_{g3} \cos \alpha_3 \cos(\Theta_3 - \Theta_1) \ell_1 \ddot{\Theta}_3 - m_3 \ell_{g3} \sin \alpha_3 \sin(\Theta_3 - \Theta_1) \ell_1 \ddot{\Theta}_3 \\ &\quad - m_2 \ell_{g2} \sin \alpha_2 \cos(\Theta_2 - \Theta_1) \ell_1 \dot{\Theta}_2^2 \\ &\quad - (m_2 \ell_{g2} \cos \alpha_2 + m_3 \ell_2) \sin(\Theta_2 - \Theta_1) \ell_1 \dot{\Theta}_2^2 \\ &\quad - m_3 \ell_{g3} \sin \alpha_3 \cos(\Theta_3 - \Theta_1) \ell_1 \dot{\Theta}_3^2 - m_3 \ell_{g3} \cos \alpha_3 \sin(\Theta_3 - \Theta_1) \ell_1 \dot{\Theta}_3^2 \\ &\quad - m_1 \ell_{g1} \sin \alpha_1 g \sin \Theta_1 + (m_1 \ell_{g1} \cos \alpha_1 + m_2 \ell_1 + m_3 \ell_1) g \cos \Theta_1 \end{aligned} \quad (2.34)$$

となる．また f_1 は，

$$f_1 = \tau_1 - \tau_2 - d_1 \dot{\Theta}_1 + d_2 (\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) - \mu_1 \text{sgn}(\dot{\Theta}_1) + \mu_2 \text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) \quad (2.35)$$



である。ただし、ここでは関節軸に働く抗力は一定であるとし、粘性摩擦とクーロン摩擦を考慮した。これより、第 1 リンクの運動方程式は、

$$\begin{aligned}
& (m_1\ell_{g1}^2 + m_2\ell_1^2 + m_3\ell_1^2 + I_1)\ddot{\Theta}_1 \\
& + (m_2\ell_{g2}\cos\alpha_2 + m_3\ell_2)\cos(\Theta_2 - \Theta_1)\ell_1\ddot{\Theta}_2 - m_2\ell_{g2}\sin\alpha_2\sin(\Theta_2 - \Theta_1)\ell_1\ddot{\Theta}_2 \\
& + m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\cos(\Theta_3 - \Theta_1)\ell_1\ddot{\Theta}_3 - m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\sin(\Theta_3 - \Theta_1)\ell_1\ddot{\Theta}_3 \\
& - m_2\ell_{g2}\sin\alpha_2\cos(\Theta_2 - \Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_2^2 - (m_2\ell_{g2}\cos\alpha_2 + m_3\ell_2)\sin(\Theta_2 - \Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_2^2 \\
& - m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\cos(\Theta_3 - \Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_3^2 - m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\sin(\Theta_3 - \Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_3^2 \\
& - m_1\ell_{g1}\sin\alpha_1g\sin\Theta_1 + (m_1\ell_{g1}\cos\alpha_1 + m_2\ell_1 + m_3\ell_1)g\cos\Theta_1 \\
& = \tau_1 - \tau_2 - d_1\dot{\Theta}_1 + d_2(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) - \mu_1\text{sgn}(\dot{\Theta}_1) + \mu_2\text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1)
\end{aligned} \tag{2.36}$$

となる。同様に、第 2 リンクの運動方程式は

$$\begin{aligned}
& (m_2\ell_{g2}\cos\alpha_2 + m_3\ell_2)\cos(\Theta_2 - \Theta_1)\ell_1\ddot{\Theta}_1 - m_2\ell_{g2}\sin\alpha_2\sin(\Theta_2 - \Theta_1)\ell_1\ddot{\Theta}_1 \\
& + (m_2\ell_{g2}^2 + m_3\ell_2^2 + I_2)\ddot{\Theta}_2 \\
& + m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\cos(\Theta_3 - \Theta_2)\ell_2\ddot{\Theta}_3 - m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\sin(\Theta_3 - \Theta_2)\ell_2\ddot{\Theta}_3 \\
& + m_2\ell_{g2}\sin\alpha_2\cos(\Theta_2 - \Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_1^2 + (m_2\ell_{g2}\cos\alpha_2 + m_3\ell_2)\sin(\Theta_2 - \Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_1^2 \\
& - m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\cos(\Theta_3 - \Theta_2)\ell_2\dot{\Theta}_3^2 - m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\sin(\Theta_3 - \Theta_2)\ell_2\dot{\Theta}_3^2 \\
& - m_2\ell_{g2}\sin\alpha_2g\sin\Theta_2 + (m_2\ell_{g2}\cos\alpha_2 + m_3\ell_2)g\cos\Theta_2 \\
& = \tau_2 - \tau_3 - d_2(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) + d_3(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) - \mu_2\text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) + \mu_3\text{sgn}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2)
\end{aligned} \tag{2.37}$$

となり、第 3 リンクの運動方程式は

$$\begin{aligned}
& m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\cos(\Theta_3 - \Theta_1)\ell_1\ddot{\Theta}_1 - m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\sin(\Theta_3 - \Theta_1)\ell_1\ddot{\Theta}_1 \\
& + m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\cos(\Theta_3 - \Theta_2)\ell_2\ddot{\Theta}_2 - m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\sin(\Theta_3 - \Theta_2)\ell_2\ddot{\Theta}_2 \\
& + (m_3\ell_{g3}^2 + I_3)\ddot{\Theta}_3 \\
& + m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\cos(\Theta_3 - \Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_1^2 + m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\sin(\Theta_3 - \Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_1^2 \\
& + m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\cos(\Theta_3 - \Theta_2)\ell_2\dot{\Theta}_2^2 + m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\sin(\Theta_3 - \Theta_2)\ell_2\dot{\Theta}_2^2 \\
& - m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3g\sin\Theta_3 + m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3g\cos\Theta_3 \\
& = \tau_3 - d_3(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) - \mu_3\text{sgn}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2)
\end{aligned} \tag{2.38}$$

となる。以上より、マニピュレータの運動方程式は、

$$M_a(\Theta)\ddot{\Theta} + C_a(\Theta, \dot{\Theta}) = \mathbf{T} \tag{2.39}$$

とする。ただし、

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \Theta_2 \\ \Theta_3 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$T = \begin{bmatrix} \tau_1 - \tau_2 \\ \tau_2 - \tau_3 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

ここで M_a は慣性, C_a はコリオリ力, 重力, 粘性摩擦力, クーロン摩擦力を表している. 式 (2.36)~(2.38) に現れるパラメータは以下の 15 個であり,

$$p_1 = m_1 \ell_{g1}^2 + m_2 \ell_1^2 + m_3 \ell_1^2 + I_1 \quad (2.42)$$

$$p_2 = m_2 \ell_{g2}^2 + m_3 \ell_2^2 + I_2 \quad (2.43)$$

$$p_3 = m_3 \ell_{g3}^2 + I_3 \quad (2.44)$$

$$p_4 = m_1 \ell_{g1} \cos \alpha_1 + m_2 \ell_1 + m_3 \ell_1 \quad (2.45)$$

$$p_5 = m_1 \ell_{g1} \sin \alpha_1 \quad (2.46)$$

$$p_6 = m_2 \ell_{g2} \cos \alpha_2 + m_3 \ell_2 \quad (2.47)$$

$$p_7 = m_2 \ell_{g2} \sin \alpha_2 \quad (2.48)$$

$$p_8 = m_3 \ell_{g3} \cos \alpha_3 \quad (2.49)$$

$$p_9 = m_3 \ell_{g3} \sin \alpha_3, \quad (2.50)$$

$$p_{10} = d_1 \quad (2.51)$$

$$p_{11} = d_2 \quad (2.52)$$

$$p_{12} = d_3 \quad (2.53)$$

$$p_{13} = \mu_1 \quad (2.54)$$

$$p_{14} = \mu_2 \quad (2.55)$$

$$p_{15} = \mu_3 \quad (2.56)$$

これらは未知の最小動力学パラメータを構成する. ただし, ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3 は容易に計測可能なため, 既知の定数として扱う. 最小動力学パラメータを用いると, M_a, C_a は以下で表される.



$$M_a = \begin{bmatrix} p_1 & (p_6 C_{21} - p_7 S_{21})\ell_1 & (p_8 C_{31} - p_9 S_{31})\ell_1 \\ (p_6 C_{21} - p_7 S_{21})\ell_1 & p_2 & (p_8 C_{32} - p_9 S_{32})\ell_2 \\ (p_8 C_{31} - p_9 S_{31})\ell_1 & (p_8 C_{32} - p_9 S_{32})\ell_2 & p_3 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

$$C_a = \begin{bmatrix} -(p_7 C_{21} + p_6 S_{21})\ell_1 \dot{\Theta}_2^2 - (p_9 C_{31} + p_8 S_{31})\ell_1 \dot{\Theta}_3^2 - p_5 g S_1 + p_4 g C_1 \\ (p_7 C_{21} + p_6 S_{21})\ell_1 \dot{\Theta}_1^2 - (p_9 C_{32} + p_8 S_{32})\ell_2 \dot{\Theta}_3^2 - p_7 g S_2 + p_6 g C_2 \\ (p_9 C_{31} + p_8 S_{31})\ell_1 \dot{\Theta}_1^2 - (p_9 C_{32} + p_8 S_{32})\ell_2 \dot{\Theta}_2^2 - p_9 g S_3 + p_8 g C_3 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

$$+ \begin{bmatrix} p_{10} \dot{\Theta}_1 - p_{11}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) \\ p_{11}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) - p_{12}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) \\ p_{12}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) \end{bmatrix} + C_f \quad (2.59)$$

$$C_f = \begin{bmatrix} p_{13} \text{sgn}(\dot{\Theta}_1) - p_{14} \text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) \\ p_{14} \text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) - p_{15} \text{sgn}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) \\ p_{15} \text{sgn}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

ただし,

$$S_{ij} = \sin(\Theta_i - \Theta_j) \quad (2.61)$$

$$C_{ij} = \cos(\Theta_i - \Theta_j) \quad (2.62)$$

と表記した。また,

$$T_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

$$T_\tau = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

とすると,

$$M_r(\boldsymbol{\theta}) = T_\tau^{-1} M_a(\boldsymbol{\Theta}) T_\theta \quad (2.65)$$

$$C_r(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = T_\tau^{-1} C_a(\boldsymbol{\Theta}, \dot{\boldsymbol{\Theta}}) \quad (2.66)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

と置き換えることにより, 相対角表現の運動方程式,

$$M_r(\boldsymbol{\theta}) \ddot{\boldsymbol{\theta}} + C_r(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.68)$$

を得る。ただし、

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

とした。



第 3 章

誤差解析に基づく摩擦補償のためのフィードフォワード制御

3.1 はじめに

本章では、ロボットの周期運動で影響が大きいと考えられるクーロン摩擦力の補償を、周期運動におけるクーロン摩擦の手先誤差に対する感度を考慮して設計する。1 章で述べたように、溶接中に周期的な揺動運動であるウィービングを行うアーク溶接ロボットでは、上下方向のずれ抑制が最重要であるが、振幅誤差も溶接の仕上がりに影響を与えるため抑制が必要である。手先誤差に影響を与える要素の中で本章ではクーロン摩擦を取り上げる。

符号関数でモデル化したクーロン摩擦トルクに対し、クーロン摩擦トルクと逆方向の補償フィードフォワードトルクを入力すれば打ち消せる。しかし、タイミングずれを考慮した場合、発生しているクーロン摩擦トルクを助長する形でクーロン摩擦トルクと補償トルクの合成トルクが残ることで駆動系に悪影響を与えることが懸念される。そこで本章では、図 3.1 のように、この補償フィー

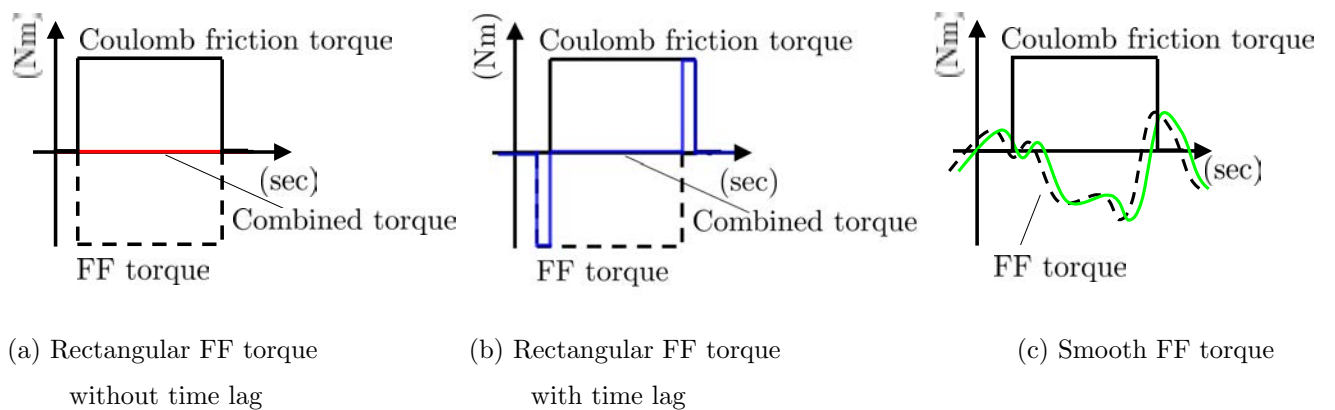


Fig.3.1: Concept of smooth FF torque to reduce Coulomb friction.

ドフォワードトルクをなめらかにすることを検討する。すなわち、本章の目的は手先誤差を低減するなめらかなクーロン摩擦補償フィードフォワードトルクを求めることである。図 3.1 の (a) は黒

実線で表すクーロン摩擦トルクを打ち消すように符号関数でモデル化したクーロン摩擦トルクの符号を反転させたものを破線で示すようにフィードフォワードトルクとして入力した場合である。クーロン摩擦の変化と完全に同時刻にトルクを変化させるフィードフォワードトルクを入力できれば、合成されたトルクは零となり赤線のようにクーロン摩擦トルクを打ち消すことができる。しかし、実際にはサーボアンプなどの時間遅れやむだ時間があるため、(b) の黒実線と破線のようにずれが発生する場合がある。むだ時間がある場合、合成トルクは青線で表したようにパルス状に変化する部分が残る、駆動系への悪影響を及ぼすと考えられる。このずれは速度の正負が入れ替わる際に発生する矩形の外乱となり、ウィービングのような周期運動では頻繁に現れる。一方、(c) の破線のようにクーロン摩擦トルクを打ち消しつつ、なめらかに変化する補償フィードフォワードトルクが算出できれば、緑線のようにタイミングずれが発生したとしてもその影響が受けにくいものと考えられる。

これに対し、中塚ら [36] は運動の周期性に着目したフィードフォワードトルク設計手法を提案した。なめらかなフィードフォワードトルクを求めるために、周期的な運動におけるクーロン摩擦トルクの手先誤差に対する感度を利用し、感度が低くなる補償トルクをなめらかになるという条件のもとで求めることにより目的の補償トルクを得ることを考慮している。平面 3 リンクマニピュレータは 3 つの入力用アクチュエータを持つ。マニピュレータの出力点を手先の位置 x, y と姿勢の 3 つとすれば入力と出力の数は等しく、クーロン摩擦による手先誤差の補償は図 3.1(a) のように摩擦力を打ち消す符号を逆としたフィードフォワードトルクが唯一解となる。一方、出力を例えば手先の y 方向のみとすることで、出力数 < 入力数となり、入力に冗長性が発生する。この冗長自由度を利用して図 3.1(c) のようななめらかなクーロン摩擦補償トルクを求めている。しかし、シミュレーションでの検討にとどまっているうえ、符号関数の計算における数値的な不安定性の課題があり、特にクーロン摩擦係数が大きい場合には正確な値が得られにくいといった問題点が残る。

そこで本章では、中塚ら [36] の手法をもとにロボットの周期運動におけるクーロン摩擦の影響による誤差を打ち消すフィードフォワードトルクの設計手法を提案し、実験用ロボットを用いてその効果を検証する。溶接品質に影響を与える上下方向の誤差と振幅に対する誤差を低減することを目指すとし、なめらかなフィードフォワードトルクを導出する。

3.2 ロボットの動力学モデル

3.2.1 クーロン摩擦を考慮した平面 3 リンクマニピュレータの運動方程式

本章では、直列ロボットの周期運動の例として図 3.2 に表す平面 3 リンクマニピュレータが手先を周期的に揺動させる場合を考える。各関節の角度を $\theta_1 \sim \theta_3$ 、各関節が発生するトルクを $\tau_1 \sim \tau_3$ とし、式 (2.67)、式 (2.69) のようにまとめて、 θ 、 τ と表す。また、各関節のクーロン摩擦係数を $\mu_1 \sim \mu_3$ とする。その運動方程式は、式 (2.68) より、

$$M_r(\theta)\ddot{\theta} + C_r(\theta, \dot{\theta}) = \tau - \mu \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (3.1)$$



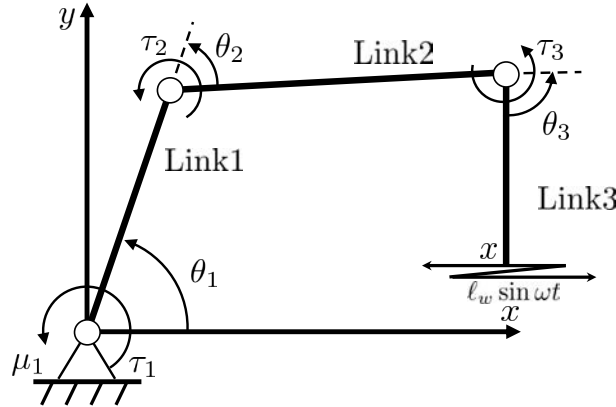


Fig.3.2: Model of a planar 3-link manipulator and its motion.

と表すことができる．なお，右辺第2項はクーロン摩擦力を表す．クーロン摩擦係数 μ は

$$\mu = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \mu_3) \quad (3.2)$$

とした．なお，検討の対象としている周期運動の振幅はロボットの大きさに比べ小さな動きである．そのため，この周期動作中の各関節角度の変化は大きくないと想定されるため，関節にかかる負荷は一定と仮定した．

3.2.2 目標軌道とコントローラ

ロボットの手先 x に， (x^c, y^c) を中心とし，水平方向 (x 方向) に振幅 ℓ_w ，角周波数 ω の周期的な動作

$$\mathbf{x}^r(t) = \begin{bmatrix} x^r \\ y^r \\ \phi^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^c + \ell_w \sin \omega t \\ y^c \\ -\pi/2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

を目標として与える．手先角度 $\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ は下向きである $-\pi/2$ rad で一定値とした．コントローラはPD制御とフィードフォワード制御を用いて構成する．PD制御には $\mathbf{x}^r$ から逆運動学解析によって算出される関節目標角度 $\boldsymbol{\theta}^r$ ，関節目標角速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}^r$ と比例ゲイン K_p と速度ゲイン K_d を用いた．関節トルク $\boldsymbol{\tau}$ は逆動力学解析から得られるフィードフォワードトルク $\boldsymbol{\tau}^r$ を用いて

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}^r - K_p(\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}^r) - K_d(\dot{\boldsymbol{\theta}} - \dot{\boldsymbol{\theta}}^r) \quad (3.4)$$

と定義する．ただし， $\boldsymbol{\tau}^r$ は $\mu = 0$ として計算を行った．

3.3 クーロン摩擦による手先誤差の推定

3.3.1 感度に基づく誤差解析 [36]

式 (3.1) から，クーロン摩擦力を外乱とみなしてクーロン摩擦の手先位置に対する感度を考え，誤差解析を行う．まず，外乱を零とし，関節目標角度 θ^r からのずれ $\Delta\theta$ ，関節目標角速度 $\dot{\theta}^r$ からのずれ $\Delta\dot{\theta}$ ，関節目標角加速度 $\ddot{\theta}^r$ からのずれ $\Delta\ddot{\theta}$ ，および関節トルクのずれ $\Delta\tau$ を考え，

$$\theta = \theta^r + \Delta\theta \quad (3.5)$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}^r + \Delta\dot{\theta} \quad (3.6)$$

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}^r + \Delta\ddot{\theta} \quad (3.7)$$

$$\tau = \tau^r + \Delta\tau \quad (3.8)$$

と定義する．次に式 (3.1) を式 (3.5)～(3.8) の θ^r ， $\dot{\theta}^r$ ， $\ddot{\theta}^r$ ， τ^r まわりで線形化する．式 (3.5)～(3.8) を式 (3.1)，(3.4) に代入すると，

$$M_r(\theta^r + \Delta\theta)(\ddot{\theta}^r + \Delta\ddot{\theta}) + C_r(\theta^r + \Delta\theta, \dot{\theta}^r + \Delta\dot{\theta}) = \tau^r + \Delta\tau \quad (3.9)$$

$$\Delta\tau = -K_p\Delta\theta - K_d\Delta\dot{\theta} \quad (3.10)$$

となる．さらにテイラー展開の一次近似を用いて変形し，整理することで

$$M_r(\ddot{\theta}^r + \Delta\ddot{\theta}) + \frac{\partial M_r}{\partial \theta} \ddot{\theta}^r \Delta\theta + C_r + \frac{\partial C_r}{\partial \theta} \Delta\theta + \frac{\partial C_r}{\partial \dot{\theta}} \Delta\dot{\theta} = \tau^r - K_p\Delta\theta - K_d\Delta\dot{\theta} \quad (3.11)$$

$$M_r\ddot{\theta} + C_r + \left(\frac{\partial M_r}{\partial \theta} \ddot{\theta}^r + \frac{\partial C_r}{\partial \theta} + K_p \right) \Delta\theta + \left(\frac{\partial C_r}{\partial \dot{\theta}} + K_d \right) \Delta\dot{\theta} = \tau^r \quad (3.12)$$

を得る．ただし，

$$M_r = M_r(\theta^r) \quad (3.13)$$

$$C_r = C_r(\theta^r, \dot{\theta}^r) \quad (3.14)$$

であり，

$$\frac{\partial M_r}{\partial \theta} \ddot{\theta}^r = \begin{bmatrix} \frac{\partial M_r}{\partial \theta_1} \ddot{\theta}^r & \frac{\partial M_r}{\partial \theta_2} \ddot{\theta}^r & \frac{\partial M_r}{\partial \theta_3} \ddot{\theta}^r \end{bmatrix} \in R^{3 \times 3} \quad (3.15)$$



で定義される。これより,

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = A_1^{c1} \boldsymbol{\theta} + A_2^{c1} \dot{\boldsymbol{\theta}} + B^{c1} \boldsymbol{\tau}^r + C^{c1} \quad (3.16)$$

$$A_1^{c1} = -M_r^{-1} \left(\frac{\partial M_r}{\partial \boldsymbol{\theta}} \ddot{\boldsymbol{\theta}}^r + \frac{\partial C_r}{\partial \boldsymbol{\theta}} + K_p \right) \quad (3.17)$$

$$A_2^{c1} = -M_r^{-1} \left(\frac{\partial C_r}{\partial \dot{\boldsymbol{\theta}}} + K_d \right) \quad (3.18)$$

$$B^{c1} = M_r^{-1} \quad (3.19)$$

$$C^{c1} = -M_r^{-1} C_r - A_1 \boldsymbol{\theta}^r - A_2 \dot{\boldsymbol{\theta}}^r \quad (3.20)$$

を得る。これを変形し,

$$\dot{\mathbf{q}} = A^{c2} \mathbf{q} + B^{c2} \boldsymbol{\tau}^r + C^{c2} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$A^{c2} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_1^{c1} & A_2^{c1} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$B^{c2} = \begin{bmatrix} 0 \\ B^{c1} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$C^{c2} = \begin{bmatrix} 0 \\ C^{c1} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

の線形時変状態方程式を得る。さらに, 双一次変換を用いてサンプリング時間 T で離散化する。シフトオペレータを q で表すと, 時刻 k の $\dot{\mathbf{q}}$ は

$$\dot{\mathbf{q}}_k = \mathbf{q}_k \frac{2(q-1)}{T(q+1)} \quad (3.26)$$

で近似されるので,

$$\mathbf{q}_k \frac{2(q-1)}{T(q+1)} = A_k \mathbf{q}_k + B_k \boldsymbol{\tau}_k^r + C_k \quad (3.27)$$

$$2(\mathbf{q}_{k+1} - \mathbf{q}_k) = T(A_{k+1} \mathbf{q}_{k+1} + B_{k+1} \boldsymbol{\tau}_{k+1}^r + C_{k+1} + A_k \mathbf{q}_k + B_k \boldsymbol{\tau}_k^r + C_k) \quad (3.28)$$

となり, 整理すると

$$\mathbf{q}_{k+1} = A_k \mathbf{q}_k + B_k^0 \boldsymbol{\tau}_k^r + B_k^1 \boldsymbol{\tau}_{k+1}^r + C_k \quad (3.29)$$

で表される離散時間状態方程式を得る．ただし，

$$\mathbf{q}_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_k \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_k \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$A_k^t = (2I - TA_{k+1}^{c2})^{-1}(2I + TA_k^{c2}) \quad (3.31)$$

$$B_k^{t0} = (2I - TA_{k+1}^{c2})^{-1}TB_k^{c2} \quad (3.32)$$

$$B_k^{t1} = (2I - TA_{k+1}^{c2})^{-1}TB_{k+1}^{c2} \quad (3.33)$$

$$C_k^t = (2I - TA_{k+1}^{c2})^{-1}T(C_{k+1}^{c2} + C_k^{c2}) \quad (3.34)$$

である．ここで，クーロン摩擦トルクを周期 T でサンプリングしたものを $\boldsymbol{\tau}^f$ とする． $\boldsymbol{\tau}^f$ の影響によって $\mathbf{q}$ が目標軌道 $\mathbf{q}^r$ から $\Delta\mathbf{q}$ だけ変動すると考えると以下を得る．

$$\Delta\mathbf{q}_{k+1} = A_k\Delta\mathbf{q}_k + B_k^0\boldsymbol{\tau}_k^f + B_k^1\boldsymbol{\tau}_{k+1}^f \quad (3.35)$$

定常状態で目標の運動が周期的であることから， $\Delta\mathbf{q}$ も周期的であると仮定する．つまり，目標運動の周期を N としたとき， $\Delta\mathbf{q}_{N+1} = \Delta\mathbf{q}_1$ として式 (3.35) を整理すると，

$$\begin{bmatrix} -A_1 & I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -A_2 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & 0 & 0 & \cdots & -A_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{q}_1 \\ \Delta\mathbf{q}_2 \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{q}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1^0 & B_1^1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & B_2^0 & B_2^1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_N^1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & B_N^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_1^f \\ \boldsymbol{\tau}_2^f \\ \vdots \\ \boldsymbol{\tau}_N^f \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

を得る．これを新たに以下のように書く．

$$A_s\Delta\mathbf{Q} = B_s\mathbf{T}^f \quad (3.37)$$



ただし,

$$A_s = \begin{bmatrix} -A_1 & I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -A_2 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & 0 & 0 & \cdots & -A_N \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$\Delta Q = \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \vdots \\ \Delta q_N \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$B_s = \begin{bmatrix} B_1^0 & B_1^1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & B_2^0 & B_2^1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ B_N^1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & B_N^0 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$T^f = \begin{bmatrix} \tau_1^f \\ \tau_2^f \\ \vdots \\ \tau_N^f \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

である． ΔQ について整理すれば,

$$\Delta Q = S^f T^f \quad (3.42)$$

$$S^f = A_s^{-1} B_s \quad (3.43)$$

のように，クーロン摩擦による目標関節角度，目標関節角速度からの変位を線形の関係で表すことができる．ここで， S^f はクーロン摩擦に対する関節角度・関節角速度の感度を意味する．さらに，式 (2.5) のヤコビ行列 J を用いて ΔQ を手先変位に変換することで，

$$\Delta X = J S^f T^f \quad (3.44)$$

$$\Delta X = J \Delta Q \quad (3.45)$$

と，クーロン摩擦と手先変位の関係を表すことができる．

3.3.2 目的動作に固有な誤差の方向性

ここで，タスクごとに重要視される誤差の方向性の例としてアーク溶接時のウィービング動作での誤差を考える．ウィービング中では，上下方向つまり y 方向の目標軌道からの誤差を低減することが重要であるため， y 方向の誤差は目的軌道すべての点で考慮し，振幅方向つまり x 方向の誤

差は周期運動の振幅の両端から δ_x の範囲のみ考慮するという目標タスク特有の評価基準を反映させる．なお、 δ_x は周期運動の振幅に対し十分小さな値とする．そこで、以下の重み行列 W を導入する．

$$W = \begin{bmatrix} w_1^x & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & w_1^y & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_N^x & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & w_N^y \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

$$w_k^x = \begin{cases} 1 & ||x_k^r - x^c| - \ell_w| < \delta_x \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.47)$$

$$w_k^y = 1 \quad (3.48)$$

これを用いると、これらタスク固有の評価を考慮した誤差は、式 (3.44) より、

$$\Delta \mathbf{X}_w = W \mathbf{J} S^f \mathbf{T}^f \quad (3.49)$$

と表すことができる．

3.4 フィードフォワードトルク的设计

クーロン摩擦補償のためのフィードフォワードトルク $\mathbf{T}^{ff}$ を加えたときの誤差 $\Delta \mathbf{X}'_w$ は

$$\Delta \mathbf{X}'_w = W \mathbf{J} S^f (\mathbf{T}^f + \mathbf{T}^{ff}) \quad (3.50)$$

と表すことができる．ただし、 $\mathbf{T}^{ff}$ は各時刻のフィードフォワードトルク τ^{ff} を用いて

$$\mathbf{T}^{ff} = \begin{bmatrix} \tau_1^{ff} \\ \tau_2^{ff} \\ \vdots \\ \tau_N^{ff} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

とする．これにより、 $\Delta \mathbf{X}'_w$ を最小化する $\mathbf{T}^{ff}$ は、任意のベクトル $\boldsymbol{\alpha}$ を用いて

$$\mathbf{T}^{ff} = -\mathbf{T}^f + (W \mathbf{J} S^f)^\perp \boldsymbol{\alpha} \quad (3.52)$$

と表される．さらに、トルクの大きさを低減しつつ、なめらかなフィードフォワードトルクを得るため、以下の評価関数 J_c を最小化する $\boldsymbol{\alpha}$ を求める．

$$J_c = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta_c \|\tau_k^{ff}\|^2 + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\tau_{k+1}^{ff} - \tau_k^{ff}\|^2 \quad (3.53)$$

$$= \frac{1}{N} \|\mathbf{E} \mathbf{T}^{ff}\|^2 \quad (3.54)$$



式 (3.53) の右辺第1項はフィードフォワードトルクの大きさを低減する項であり、右辺第2項が変化を低減する項である。なお、 δ_c はこの2つの項のバランスを調整する重みである。ただし、重み行列 E は δ_c を含む係数行列であり、

$$E = \begin{bmatrix} \delta_c I_3 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \delta_c I_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \delta_c I_3 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \delta_c I_3 \\ -I_3 & I_3 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -I_3 & I_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -I_3 & I_3 \\ I_3 & 0 & \cdots & 0 & -I_3 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

となる。なお、定常状態で運動が周期的なことから、 $\tau_{N+1}^{ff} = \tau_1^{ff}$ とした。これにより α は

$$\alpha = (E(WJS^f)^\perp)^\# E T^f \quad (3.56)$$

で得られる。この α を式 (3.52) に代入することによって、方向重み付きの手先誤差を最小化するなめらかなフィードフォワードトルク T^{ff} を得る。

3.5 繰り返し計算による関節角誤差推定精度向上

式 (3.35) の τ^f は関節角速度 $\dot{\theta}$ より

$$\tau^f = -\mu \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (3.57)$$

とした。しかし、最小化された ΔQ は、関節角速度変位 $\Delta \dot{\theta}_k$ を含むため、 τ^f は異なる値となる。そこで、 $\dot{\theta}$ に $\Delta \dot{\theta}$ を加えて更新し、 τ^f を算出することを繰り返すことでより正確なクーロン摩擦 τ^f とそれに適したクーロン摩擦補償のためのフィードフォワードトルク τ^{ff} を得る。以下で i は繰り返し回数を示す。まず、 $\dot{\theta}_i$ の初期値を $\dot{\theta}_1 = \dot{\theta}^r$ とし、 τ_i^f の初期値 τ_1^f を

$$\tau_1^f = -\mu \text{sgn}(\dot{\theta}_1^r) \quad (3.58)$$

で定め、式 (3.52)、(3.56) から T_1^{ff} を求める。また、

$$\Delta Q_2 = S^f(T_1^f + T_1^{ff}) \quad (3.59)$$

を得る。 ΔQ_2 の関節角速度の変位 $\Delta \dot{\theta}$ を抽出し、

$$\tau_2^f = -\mu \text{sgn}(\dot{\theta}_2) \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_1 + \Delta \dot{\theta} \quad (3.60)$$

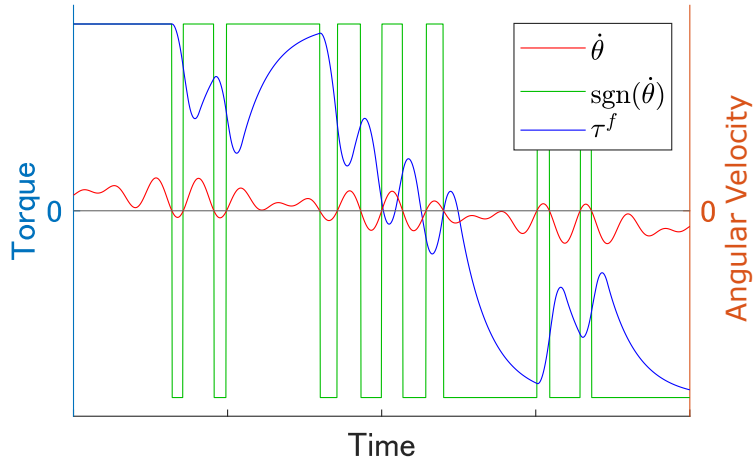


Fig.3.3: Conceptual figure of calculating friction force as a continuous value.

とする。以下、これを繰り返して τ_1^f を算出する。

T_i^f は符号関数を用いて表わされるため、 $\dot{\theta}_i$ が零付近で激しく変化する傾向が強い。特に μ が比較的大きい場合に T^f も大きく変化し、さらに ΔQ も大きく変化する。このことは繰り返し計算が収束しないことや、得られるフィードフォワードトルクが激しく入れ替わるといった結果を招きやすい。そこで、摩擦力を計算上連続値とみなして

$$T_{i+1}^f \leftarrow T_i^f + \delta(T_{i+1}^f - T_i^f) \quad (3.61)$$

と計算することとする。 δ は推定値の更新をなめらかにするための係数である。これは、図 3.3 のように $\dot{\theta}$ が零付近で激しく変化する際の符号関数を PWM(Pulse Width Modulation) 信号と計算上みなし連続信号で近似することに相当する。これにより、なめらかに変化する $\dot{\theta}$ 、 T^f 、 T^{ff} が得られるため、繰り返し計算の安定性・収束性が向上する。この手法を用いて計算したフィードフォワードトルクを図 3.4 に示す。実線がフィードフォワードトルクであり、破線はクーロン摩擦力をあらわしている。破線のクーロン摩擦力を正負反転してフィードフォワードとして入力すればクーロン摩擦力をキャンセルできるが、その場合は矩形状のフィードフォワードトルクとなる。それと比較して提案手法のフィードフォワードトルクはなめらかになっていることがわかる。

式 (3.37) において、 ΔQ は $6N$ 次元ベクトル、 τ^f は $3N$ 次元ベクトルである。一方、式 (3.50) の T^{ff} は $3N$ 次元ベクトルであるため、一般には ΔQ のすべてを零にする T^{ff} はクーロン摩擦をキャンセルする逆符号とした T^f が唯一解となる。一方、本章の手法は、手先の鉛直方向、および、水平方向の一部のみに焦点を当てることで T^{ff} の解に冗長性を持たせ、冗長自由度を利用して式 (3.53) を最小化しなめらかにするものである。図 3.4 は x^c を 455 mm、 y^c を 50 mm の位置を中心に振幅 20 mm、周波数 0.5 Hz、1 Hz、2 Hz とした場合の式 (3.3) の目標軌道に対して算出したクーロン摩擦を低減するフィードフォワードトルクと、クーロン摩擦トルクである。実線でフィードフォワードトルクを、破線でクーロン摩擦トルクを表した。クーロン摩擦トルクは目標軌道 x^r の



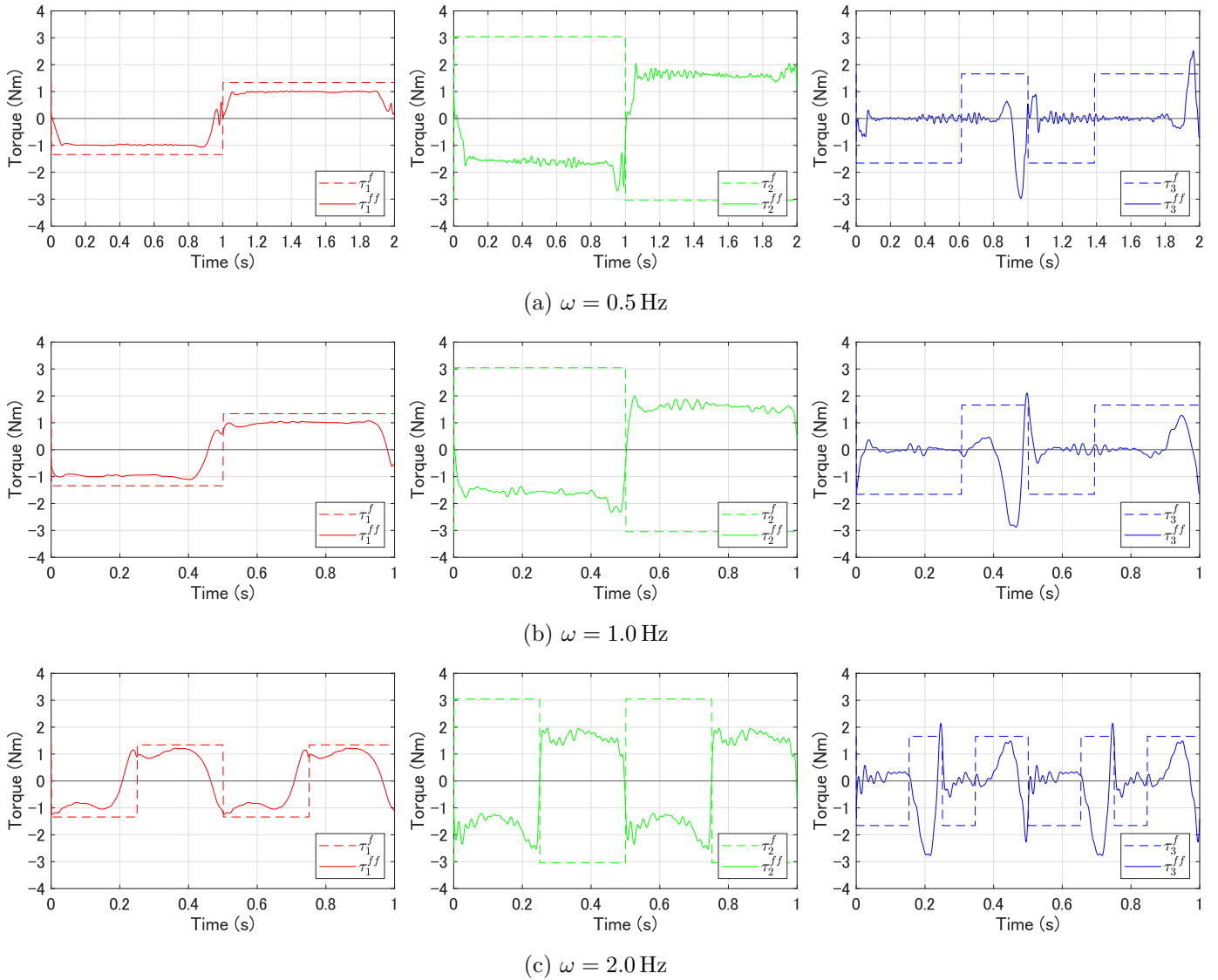


Fig.3.4: Feedforward torque to reduce Coulomb friction.

位置より逆運動学解析によって求めた関節速度から式 (3.1) 右辺と同様に $\mu \text{sgn}(\dot{\theta})$ により算出した。式 (3.36) は周期的な運動の $\mathbf{T}^f$ による定常解を表しているの、図 3.4 のように、クーロン摩擦力が変化する手前から変化するクーロン摩擦が働くことを予見した $\mathbf{T}^{ff}$ が得られる。なお、 $\mathbf{T}^{ff}$ の中の特に τ_1^{ff} はクーロン摩擦を打ち消すのではなく、助長するようなトルクとなっているように見えるが、得られた $\mathbf{T}^{ff}$ は式 (3.53) を最小化する解であるため、クーロン摩擦の手先誤差への影響を抑えるためにはそれをキャンセルさせる以外の解も存在することを示唆している。

3.6 実験検証

3.6.1 実験装置の構成

図 3.5 に実験装置の構成を，諸元を表 3.1 に示す．モータは DC サーボモータを使用し，減速機として波動歯車を用いた．本章では手先位置 $\boldsymbol{x}$ は，各エンコーダで計測した関節角度を順運動学解析により手先位置へ変換したものをを用いる．各軸に配置されたエンコーダの分解能は手先位置に換算して約 $13\mu\text{m}$ であり計測に十分な分解能を有している．また，クーロン摩擦係数は各軸毎に等速運動させたときの計測トルクを用いて表 3.2 のように別途パラメータ同定を行った．詳細は付録 A に示す．クーロン摩擦係数は第二関節が最大で $3.05\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ と比較的大きく，繰り返し計算での精度向上が必要であった．

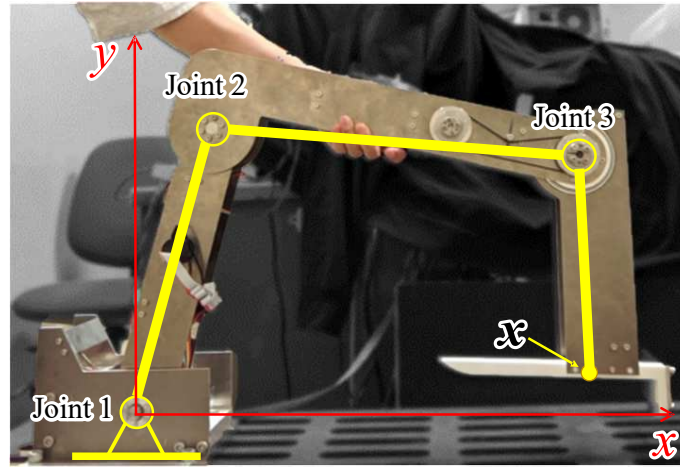


Fig.3.5: Configuration of the experimental robot.

Table 3.1: Experimental robot specifications.

	Joint 1	Joint 2	Joint 3
Link length	335.0 mm	439.5 mm	250.0 mm
Motor nominal power	90 W	60 W	
Reduction ratio	1/100		
Encoder resolution	9.0×10^{-4} deg/pulse		

Table 3.2: The friction coefficient of an experimental robot by parameter identification.

	Joint 1	Joint 2	Joint 3
Coulomb friction coefficient	$1.34\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$	$3.05\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$	$1.66\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
Viscous friction coefficient	$8.34\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$	$3.45\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$	$3.16\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$

3.6.2 実験結果と考察

実験では $x^c = 455 \text{ mm}$, $y^c = 50 \text{ mm}$ の点を中心に x 方向に振幅 20 mm , 周波数 0.5 Hz , 1 Hz , 2 Hz で 10 秒間周期的に揺動させる動作を目標値として与え, 摩擦補償のためのフィードフォワードトルクを加えた場合と加えなかった場合で計測を行った. フィードフォワードトルクの算出においては, x 方向の誤差は周期運動の両端 0.05 mm サンプル数 12 点の位置と y 方向全点の位置誤差を低減させるように式 (3.48) の重み W を決定した. また, 式 (3.53) の δ_c は 10 を, 式 (3.61) の δ は 0.1 を用いた. 1 Hz の実験結果を代表として図 3.6 に示す. 図 3.6 (a) が実験を行っている状況であり, (b)(c) はそれぞれ右下の四角部を拡大した 1 秒間の動画を比較明合成したものである. 比較明合成には, 比較明合成フリーソフト SiriusComp[75] を利用した. (b) はクーロン摩擦補償用のフィードフォワードトルクを加えなかった場合であり, クーロン摩擦の影響により上下方向の誤差が目立つ. (c) は提案手法を用いた場合で, クーロン摩擦補償用のフィードフォワードトルクの効果により上下動が低減されていることがわかる.

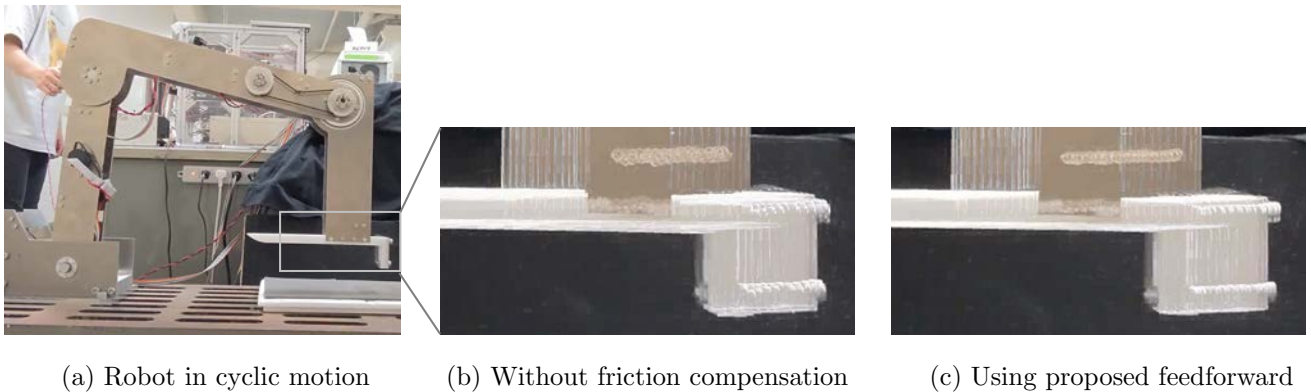


Fig.3.6: Results of friction compensation experiments.

手先位置の計測結果を図 3.7 (a)(b)(c) に目標値からの誤差を図 3.7 (d)(e)(f) に示す. 図 3.7 (a)(d) は運動の周波数を 0.5 Hz とした場合, (b)(e) が 1 Hz , (c)(f) が 2 Hz とした場合である. 図 3.7 の青がクーロン摩擦補償トルクを加えていないときの軌道, 赤が提案手法によるフィードフォワードトルクを加えた場合の軌道を示す. 動作開始直後の半周期は初期値の影響が残るため点線で表し, それ以降の 9 周期を実線で表した. 図 3.7 内の数字は位置とそのときの誤差の対応を示す代表点であり, ロボットの手先 x は $1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow 8 \rightarrow 1$ と周期運動を行う. (a)(d) の 0.5 Hz の場合と (b)(e) の 1 Hz においてクーロン摩擦補償トルクを加えない場合と比較し, 提案手法の場合では, y 方向の誤差が十分に低減されつつ, x 方向の動作も改善されている. y 方向軌道の最大値と最小値の差は 0.5 Hz のとき, 補償無し 2.4 mm に対し提案手法では 0.9 mm であり, 1 Hz で補償無し 4.3 mm に対し提案手法では 2.2 mm とともに半減した. 振幅については 0.5 Hz のとき, 補償無しでは -0.67 mm に対し提案手法では $+0.41 \text{ mm}$ と誤差の絶対値が低減でき, 1 Hz のとき, 補償無しでは -0.65 mm であったが提案手法では $+0.38 \text{ mm}$ と誤差の絶対値をほぼ半減できた. (c)(f) の

2 Hz の結果では y 方向誤差は全体的に低減されているものの、運動が斜めになる傾向が強く、 y 方向の誤差の最小値、最大値で比較するとほぼ同等であった。振幅については特に 3 の位置で目標振幅 20 mm に対し、補償無し 27 mm、提案手法で 28 mm と悪化している。両端で摩擦の影響により振幅が減少する方向に誤差が出ることを想定した摩擦補償としているが、2 Hz の結果では誤差の様相が変化しており、摩擦以外の影響により振幅が拡大方向に誤差が発生し過剰補償となったためと考えられる。

また、比較のために図 3.4 において破線で示したクーロン摩擦を単純にキャンセルする矩形のフィードフォワードトルクを加えた場合の結果を図 3.8 に示す。図 3.8 の赤が提案手法によるフィードフォワードトルクを加えた場合の軌道、緑が矩形のフィードフォワードトルクを加えた場合である。

矩形のフィードフォワードトルクを用いた場合との比較では、 y 方向軌道の最大値と最小値の差は (d) 周波数 0.5 Hz の場合、矩形のフィードフォワードトルクを用いた場合で 1.0 mm に対し提案手法の誤差 0.9 mm であり、(e) 1 Hz の場合は矩形のフィードフォワードトルクを用いた場合が 2.0 mm で提案手法の誤差 2.2 mm とほぼ同等である。(e) 周波数 2 Hz の場合、 y 方向軌道の最大値と最小値の差は矩形のフィードフォワードトルクを用いた場合で 8.8 mm に対し、提案手法 8.3 mm とこちらもほぼ同等であった。振幅については、図 3.9 に提案手法と矩形のフィードフォワードトルクの場合での周期運動 63 周期分の振幅誤差からその中央値とばらつきを示した。図内の 3 の位置と 7 の位置はそれぞれ振幅の端での誤差を表しており、図 3.8 の 3 の位置・7 の位置での誤差を表している。ここで、誤差は振幅が大きくなる場合に正となるよう求めた。図 3.9 の中央の印は振幅誤差の中央値を、バーの上下の端はそれぞれ最大値、最小値を示している。(a) 周波数 0.5 Hz の場合、提案手法の振幅誤差中央値は矩形のフィードフォワードトルクを用いた場合より減少しており、最大値・最小値の範囲はほぼ同等である。(b) 周波数 1 Hz の場合は提案手法の振幅誤差中央値は矩形のフィードフォワードトルクを用いた場合より減少し、かつ最大値・最小値の範囲も小さい。(c) 周波数 2 Hz の場合は、3 の位置での誤差の平均値では提案手法の誤差が若干拡大傾向であるが、ばらつきは同等であり、7 の位置では提案手法のばらつきが大きいものの中央値でみた誤差は減少している。これは提案手法のフィードフォワードトルクがなめらかなことによりタイミングずれの影響が低減されたものと考えられる。なお、クーロン摩擦のフィードフォワード補償無しの場合、提案手法、矩形のフィードフォワードトルクを用いた場合のすべてで周期運動が斜めになる傾向が残り、その影響は運動の周波数が 2 Hz の場合に顕著である。図 3.7、図 3.8 とともに周波数 0.5 Hz、1 Hz の結果では周期運動両端での折返し部分で特に y 方向誤差が大きくなっているのに対し、周波数 2 Hz の結果では周期運動中央部分で軌道が大きく膨らみ y 方向誤差が大きくなるなど、誤差発生の様相が大きく変化している。これはクーロン摩擦力以外の影響が大きくなっていると考えられ、その候補としては、式 (3.1) での慣性項の影響や、式 (3.1) で表されていないダイナミクスの影響が予想される。特に静止摩擦力は周期運動には大きな影響を与えるが、その値を知るには順動力学計算を繰り返す必要があり、モデル化が難しい。この解消には物理パラメータのより正確な同定や、フィードバックゲインの調整、未モデル化ダイナミクスの影響を考慮するなどコントローラ



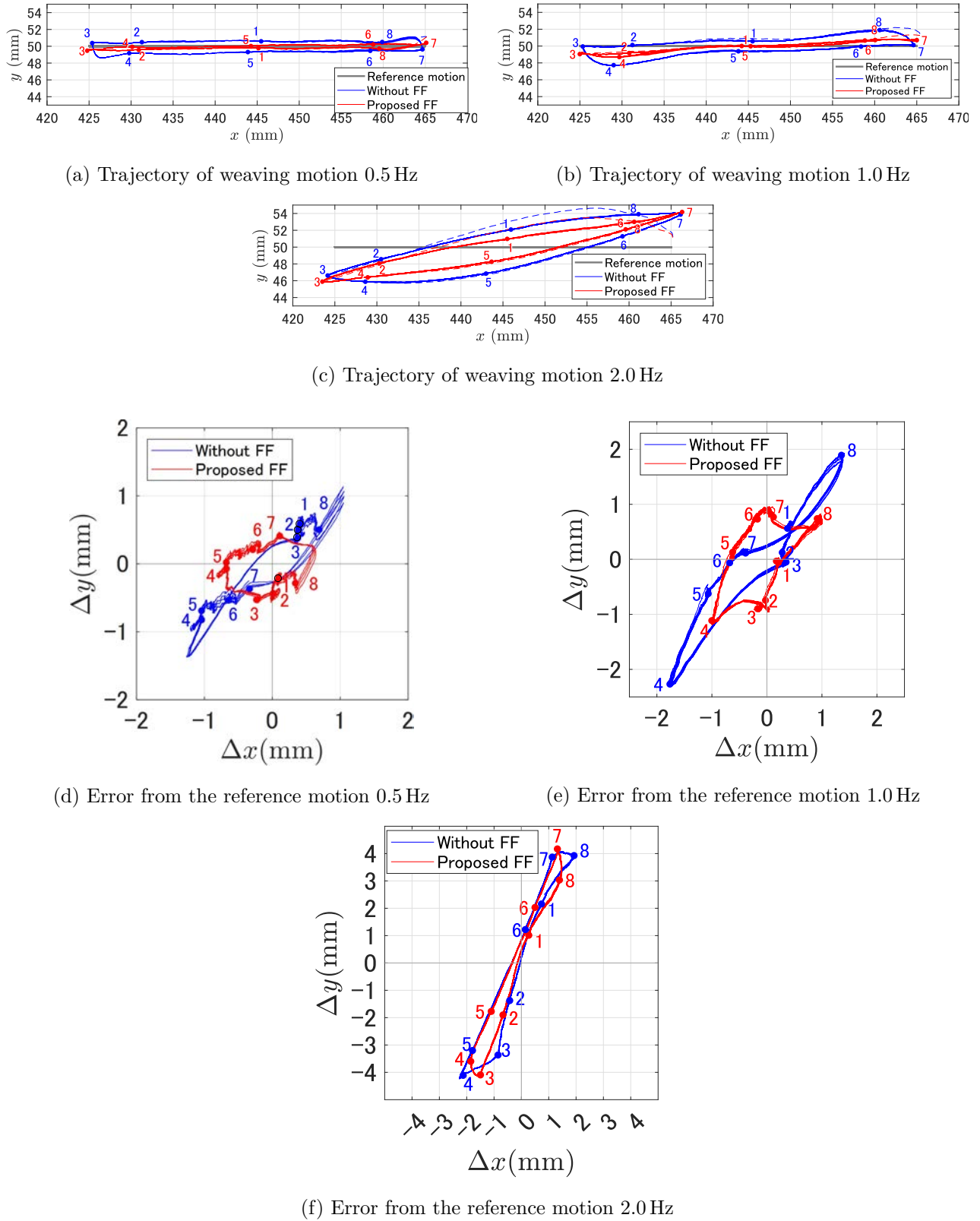


Fig.3.7: Results using feedforward compensating torque to reduce errors in the y- and partially in the x-direction.

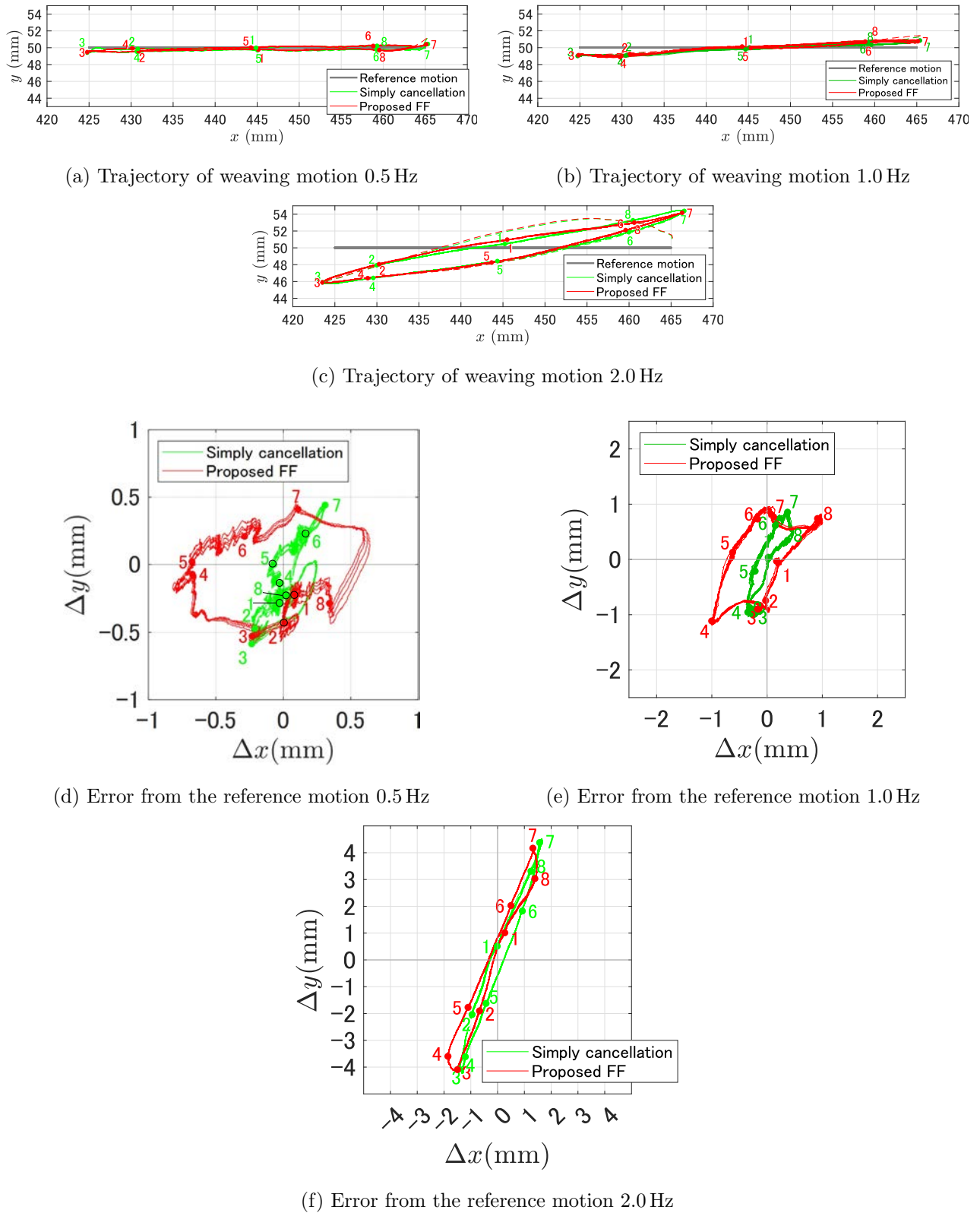
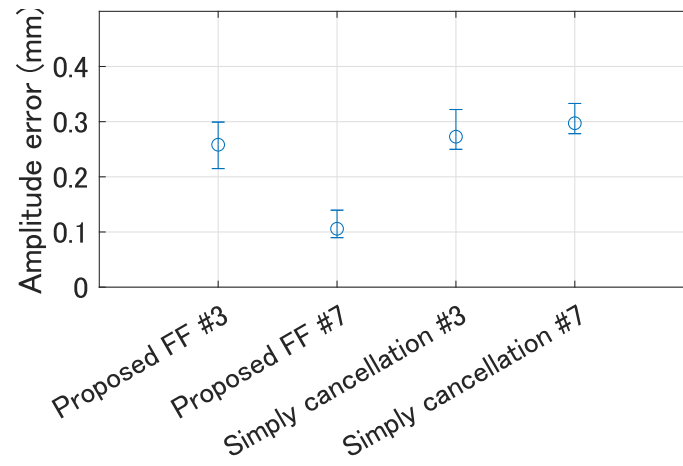
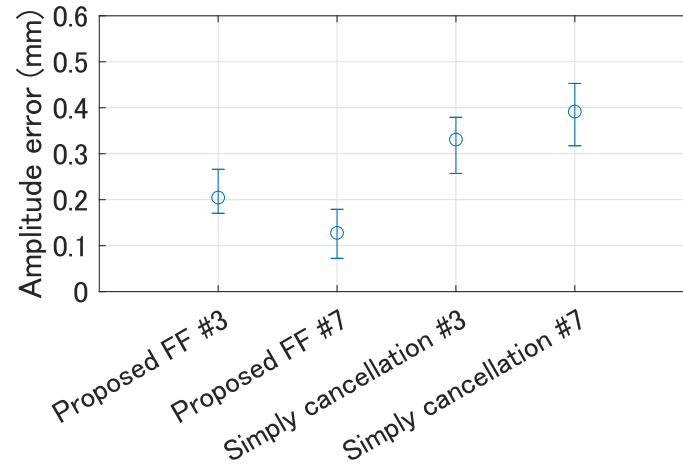


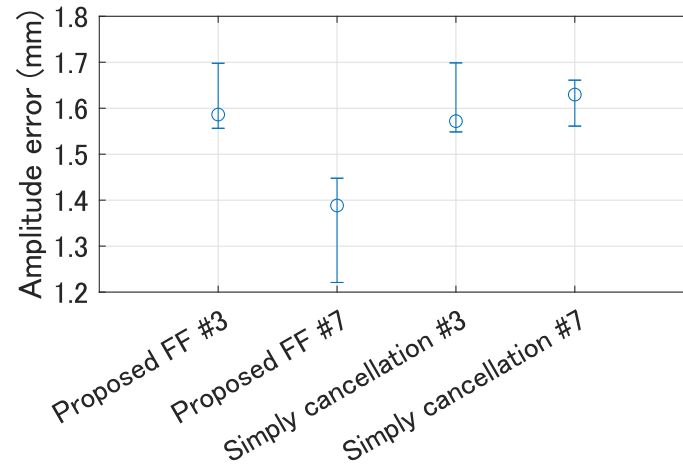
Fig.3.8: Results using rectangular feedforward torque that simply cancels the Coulomb friction and the proposed method.



(a) 0.5 Hz



(b) 1 Hz



(c) 2 Hz

Fig.3.9: Amplitude error medians and variations.

の再設計が必要であると考える.

3.7 おわりに

本章では, 周期運動中の手先誤差を低減するなめらかなフィードフォワード入力を, 感度を用いた誤差解析から導出し, 実験によりその有効性を確認した. 周期的な運動を指定して動的な感度を考慮することによって, クーロン摩擦においては運動性能の改善を行うことができた. しかし, 周波数 2 Hz の結果では, クーロン摩擦力以外の影響が顕著になっていると考えられるため, そこで次章では本章で提案した周期運動における手先誤差に対する感度を考慮するという考え方を拡張し, 指定した方向の誤差を低減する動力学パラメータを確率的に同定する手法について取り組む.



第 4 章

運動の感度解析に基づくパラメータの確率的同定

4.1 はじめに

1.2.2 節で述べたように，ロボットの追従制御でフィードフォワードとフィードバックを組み合わせた制御が用いるために物理パラメータの同定が必要であり，一般には実験データから最小二乗法により同定を行うが，ノイズの影響やモデル化されない動特性が存在するため，同定されるパラメータは真値には一致しない．モデル化する動特性の範囲を広げる目的で，関節やリンクなどの剛性などを追加し，非剛体モデルとして拡張する研究もあるものの，それでもモデル化できない動特性は残るため，同定結果はパラメータ同定に用いた動作に適したパラメータとなる．実用上，ロボットタスクでのすべての想定される動作を計測することは困難であり，また，目的の動作が決定された後でその動作に合わせてパラメータ同定を行うことは現実的ではない．この観点からすると，ロボットを使用する運動での実験データからパラメータを同定することが望ましいが，ある特定の運動は PE(Persistently Exciting) 性を満足しておらず，最小動力学パラメータのすべてを同定するだけの情報を持っておらず，不定の解しか得られない場合が多い．そのため，目的運動である周期運動がロボット全体の動作範囲からみれば小さな周期的な運動を行うという特性に合わせたパラメータを求める必要がある．そこで，本章では想定したロボットモデルと実機との差などから生じる誤差を，計算上パラメータが確率的に変動しているものとみなし，目的動作で目的の指標で性能が高いパラメータを同定する方法を提案する．その際，周期的な運動における動力学パラメータなどの手先誤差に対する感度を考慮し，手先誤差に対する感度が大きいパラメータはより精密に同定を行うことを考える．

4.2 パラメータの同定手法

4.2.1 動力学モデルと運動方程式

想定する平面 3 リンクマニピュレータの動力学モデルは図 2.2 であり，式 (2.42) から式 (2.56) で示す $p_1 \sim p_{15}$ を同定を行う最小動力学パラメータとした．これをまとめて，

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_{15} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

とする．これを用いて，式 (2.68) をパラメータ $\mathbf{p}$ に対して線形な形に書き換えると，

$$A(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \ddot{\boldsymbol{\theta}})\mathbf{p} = B(\boldsymbol{\tau}) = T_{\boldsymbol{\tau}}\boldsymbol{\tau} \quad (4.2)$$

$$A \in \mathbb{R}^{3 \times 15} \quad (4.3)$$

$$B \in \mathbb{R}^{3 \times 1} \quad (4.4)$$

となる．この式を用いてパラメータの同定を行う．

4.2.2 最小二乗法による同定

最小動力学パラメータの同定は，ロボットが動作した際の関節角度，関節角速度，関節角加速度，トルクの時系列データ，

$$\{\boldsymbol{\theta}_1 \cdots \boldsymbol{\theta}_n\} \quad (4.5)$$

$$\{\dot{\boldsymbol{\theta}}_1 \cdots \dot{\boldsymbol{\theta}}_n\} \quad (4.6)$$

$$\{\ddot{\boldsymbol{\theta}}_1 \cdots \ddot{\boldsymbol{\theta}}_n\} \quad (4.7)$$

$$\{\boldsymbol{\tau}_1 \cdots \boldsymbol{\tau}_n\} \quad (4.8)$$

に基づいて行う．これらから，式 (4.2) の A ， B の時系列データ，

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

が得られる．通常，実験データには観測ノイズなどが含まれる．そのため，最小二乗法による同定では i 番目の実験データに対して，

$$A_i \mathbf{p} = B_i + \mathbf{w}_i \quad (4.11)$$



のように白色ノイズ $\mathbf{w}_i$ を仮定する．このノイズのノルム二乗和

$$J_L = \sum_{i=1}^n \|\mathbf{w}_i\|^2 = \|\mathbf{A}\mathbf{p} - \mathbf{B}\|^2 \quad (4.12)$$

を最小化するように同定を行うことで，パラメータ $\mathbf{p}$ は，

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}^\# \mathbf{B} \quad (4.13)$$

と得られる．

4.2.3 パラメータの確率的な同定

最小二乗法による同定は式 (4.11) の $\mathbf{w}_i$ は同定に用いた運動での誤差であり，目的運動である周期運動に適した同定であるといえない．そこで，実験データはノイズを含まず，パラメータに確率的に誤差が生じるとみなす．このとき式 (4.2) を実験データ A_i , B_i に対して，

$$A_i(\mathbf{p}_0 + \Delta\mathbf{p}_i) = B_i \quad (4.14)$$

のように解釈する． $\mathbf{p}$ は母数として平均 $\mathbf{p}_0$ ，共分散を持つ確率変数とする．このとき $\Delta\mathbf{p}$ は実験データ A_i , B_i に対して共分散を指定したことによって決定された誤差である．データが n 個あるとすると，式 (4.14) は，

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_1 & \cdots & O \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_n & O & \cdots & A_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ \Delta\mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{p}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

と書ける．これを新たに，

$$\mathbf{A}_p \mathbf{P} = \mathbf{B}_p \quad (4.16)$$

とおくと， $\mathbf{p}_0$ と $\Delta\mathbf{p}_i$ は，

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}_p^\# \mathbf{B}_p + \mathbf{A}_p^\perp \boldsymbol{\alpha} \quad (4.17)$$

のように任意のベクトル $\boldsymbol{\alpha}$ を用いて表される．パラメータの確率的な同定のイメージを図 4.1 に示す．左図の雲状の楕円と右図の黒点はそれぞれ $\Delta\mathbf{p}_i$ を表している．実験データとして $\mathbf{A}_p$ と $\mathbf{B}_p$ が標本として得られたとき，共分散が指定されなければ $\Delta\mathbf{p}_i$ は図 4.1 左図のように未確定である．ここで，次節に示す感度解析によりパラメータ誤差が手先誤差にどの程度影響を与えるかを見積もり，赤い所望の誤差共分散を決定する．決定された誤差共分散に基づき $\boldsymbol{\alpha}$ を決定すると，式 (4.17) から $\Delta\mathbf{p}_i$ とともに $\mathbf{p}_0$ を求めることができる．このとき，指定する誤差共分散の形状によって $\Delta\mathbf{p}_i$ の分布も変化し，それに伴い $\mathbf{p}_0$ も変化する．所望の誤差共分散はロボットの運動中における手先位置の最小動力学パラメータに関する感度から決定する．すなわち，PE 性を満足する同定用の実

験データを用い，周期運動に影響の大きいものはその誤差分散が小さくなるよう，そうでないものは誤差分散が大きくてもよいように求め，パラメータ同定問題を重み付き最小二乗問題に帰着させる．以下ではその感度を導出する．

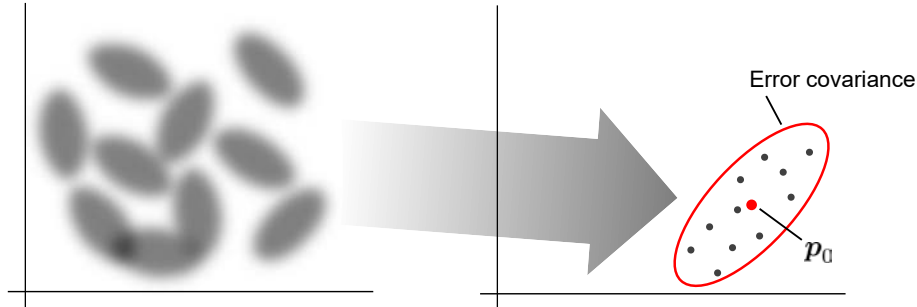


Fig.4.1: Concept of parameter identification based on sensitivity.

4.3 パラメータに関する感度解析

4.3.1 周期運動の目標軌道

周期運動の目標軌道を次式のように与える．

$$\mathbf{x}^r(t) = \begin{bmatrix} x^r + a \sin \omega t \\ y^r \\ -\pi/2 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

ここで (x^r, y^r) は周期運動の中心位置， a は振幅， ω は角周波数を表している．また，逆運動学解析より，ロボットの目標軌道の1周期分の時系列データ，

$$\boldsymbol{\theta} = \{\boldsymbol{\theta}_1^r, \dots, \boldsymbol{\theta}_N^r\} \quad (4.19)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \{\dot{\boldsymbol{\theta}}_1^r, \dots, \dot{\boldsymbol{\theta}}_N^r\} \quad (4.20)$$

が得られ，この逆動力学解析によって，フィードフォワードトルクが，

$$\boldsymbol{\tau} = \{\boldsymbol{\tau}_1^r, \dots, \boldsymbol{\tau}_N^r\} \quad (4.21)$$

と得られる．

4.3.2 周期的な運動における動的感度解析

式 (2.68) を変形すると，

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{g}(\boldsymbol{\theta})\boldsymbol{\tau} \quad (4.22)$$

となる．ここで式 (4.22) を式 (4.19)～(4.21) に示した θ_k^r , $\dot{\theta}_k^r$, τ_k^r のまわりで線形化し，サンプリングタイム T で離散化を行い，

$$\mathbf{q}_{k+1} = A_k^d \mathbf{q}_k + C_k^d \quad (4.23)$$

$$\mathbf{q}_k = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \dot{\theta}_k \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

となる離散時間状態方程式を得る．ただし，線形化の際にトルクは，

$$\tau_k = \tau_k^r + K_p(\theta_k^r - \theta_k) + K_d(\dot{\theta}_k^r - \dot{\theta}_k) \quad (4.25)$$

のようにフィードフォワードトルクに PD 制御のトルクを加えて計算した．すなわち， A_k^d は K_p , K_d を含む．式 (4.23) にパラメータ誤差 $\Delta \mathbf{p}$ を考慮して式を整理すると，

$$\Delta \mathbf{q}_{k+1} = A_k^d \Delta \mathbf{q}_k + \left(\frac{\partial A_k^d}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{q}_k + \frac{\partial C_k^d}{\partial \mathbf{p}} \right) \Delta \mathbf{p} \quad (4.26)$$

となる．ここで運動の周期性を考慮し， $\Delta \mathbf{q}_{N+1} = \Delta \mathbf{q}_1$ と仮定して式を整理すると，

$$\begin{bmatrix} -A_1^d & I & O & \cdots & O \\ O & -A_2^d & I & \cdots & O \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ I & O & O & \cdots & -A_N^d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{q}_1 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{q}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_1^d}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{q}_1 + \frac{\partial C_1^d}{\partial \mathbf{p}} \\ \vdots \\ \frac{\partial A_N^d}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{q}_N + \frac{\partial C_N^d}{\partial \mathbf{p}} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{p} \quad (4.27)$$

となる．よって，目標運動における最小動力学パラメータの周期運動での角度，角速度に対する動的感度 S_q が次式で得られる．

$$S_q = \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{p}} = \begin{bmatrix} -A_1^d & I & O & \cdots & O \\ O & -A_2^d & I & \cdots & O \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ I & O & O & \cdots & -A_N^d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial A_1^d}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{q}_1 + \frac{\partial C_1^d}{\partial \mathbf{p}} \\ \vdots \\ \frac{\partial A_N^d}{\partial \mathbf{p}} \mathbf{q}_N + \frac{\partial C_N^d}{\partial \mathbf{p}} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

さらに，

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta y_N \end{bmatrix} = \mathbf{J}_y \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{q}_1 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{q}_N \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

となる式 (2.7) のヤコビ行列 $\mathbf{J}_y$ をもちいることで，

$$S_{dy} = \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{p}} = \mathbf{J}_y S_q \quad (4.30)$$

のように周期運動における最小動力学パラメータの手先位置の鉛直方向に対する動的感度 S_{dy} が得られる．

4.3.3 力のつり合いを利用した静的感度解析

目的の周期運動は重力の影響を強く受けるため、静力学的関係から重力に起因する誤差を反映した感度を考慮する。ロボットが静止している状態を考え、式 (2.68) について、角速度 $\dot{\theta}$ 、角加速度 $\ddot{\theta}$ を 0 と仮定すると、

$$C_a(\theta, 0) = T_\tau \tau \quad (4.31)$$

を得る。ただし、角速度 $\dot{\theta}$ は 0 とするが、角速度の正負で決定されるクーロン摩擦項のみ C_a に残っている。ここで τ にフィードフォワードトルクと P 制御のトルクを入力することを考えると、

$$C_a(\theta, 0) = \tau^r + K_p(\theta^r - \theta) \quad (4.32)$$

となる。式 (4.32) をパラメータ p で微分し、整理すると、

$$\frac{\partial q}{\partial p} = \begin{bmatrix} - \left(\frac{\partial C_a(\theta, 0)}{\partial \theta} + K_p \right)^{-1} \left(\frac{\partial C_a(\theta, 0)}{\partial p} \right) \\ O \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

となり、これを式 (2.7) のヤコビ行列 J_y で変換することで、

$$S_{sy} = \frac{\partial y}{\partial p} = J_y \frac{\partial q}{\partial p} \quad (4.34)$$

となる最小動力学パラメータの手先位置の鉛直方向に対する静的感度 S_{sy} が得られる。

4.3.4 フィードフォワードトルクの感度解析

4.3.2 項と 4.3.3 項で述べた 2 つの感度はパラメータを含む関数である、そのため、パラメータ p の最適解を得るには繰り返し計算が必要である。繰り返し計算において、更新前後のパラメータの変化の影響で、フィードフォワードトルクが大きく変化すると計算が不安定性となる場合がある。これを抑制するため、フィードフォワードトルクの感度について考える。

式 (4.2) を変形すると、

$$\tau = T_\tau^{-1} A(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) p \quad (4.35)$$

となる。これをパラメータ p で微分すると、

$$S_\tau = \frac{\partial \tau}{\partial p} = T_\tau^{-1} A(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (4.36)$$

となり、周期運動における最小動力学パラメータのフィードフォワードトルクに対する感度 S_τ が得られる。なお、上記ではパラメータの変化そのものがトルクに与える影響を対象とするため、 θ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ は定数とした。

求まった感度を用いてフィードフォワードトルクの大きな変動を抑制する。そこで、

$$\|\Delta \tau\|^2 = \|S_\tau(p_0^k - p_0^{k-1})\|^2 \quad (4.37)$$



を評価し、小さくすることでパラメータ更新によるフィードフォワードトルクの大きな変動を抑える。また、フィードフォワードトルクの感度は誤差共分散の評価にも使用する。

目的とする周期運動は単調なため、計測データに全くノイズがない状態では動的/静的運動の感度は逆行列算出部分でランク落ちが発生して解を得ることができない。実際には計測データにはノイズが加わるため、ランク落ちとはならないが、一部パラメータの感度が極めて 0 に近い値が得られる恐れがある。これら感度は組み合わせて誤差共分散の同定に用いるが、感度が 0 に近い要素があると同定結果に影響を及ぼす恐れがある。そこで、

$$J_\tau = \sum_{i=1}^N \|S_\tau \Delta \mathbf{p}_i\|^2 \quad (4.38)$$

と評価する。これら式 (4.37) と式 (4.38) をいわば正則化項として合わせて最小化することで、誤差共分散の同定に制限を加えることで計算を安定化させる。

4.4 感度に基づくパラメータの同定

感度解析の結果を用いてパラメータの同定を行う。式 (4.30)、式 (4.34) の感度を用いることで、パラメータ誤差 $\Delta \mathbf{p}$ によって発生する手先の y 方向の誤差を

$$\Delta \mathbf{y}_d = S_{dy} \Delta \mathbf{p} \quad (4.39)$$

$$\mathbf{y}_d = \begin{bmatrix} \Delta y_{d1} \\ \vdots \\ \Delta y_{dN} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

$$\Delta \mathbf{y}_s = S_{sy} \Delta \mathbf{p} \quad (4.41)$$

$$\mathbf{y}_s = \begin{bmatrix} \Delta y_{s1} \\ \vdots \\ \Delta y_{sN} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

と見積もることができる。これを用いて、評価関数を

$$J_{Ic} = w_d \sum_{i=1}^N \|S_{dy} \Delta \mathbf{p}\|^2 + w_s \sum_{i=1}^N \|S_{sy} \Delta \mathbf{p}\|^2 + w_\tau \sum_{i=1}^N \|S_\tau \Delta \mathbf{p}\|^2 + \delta \|S_\tau (\mathbf{p}_0^k - \mathbf{p}_0^{k-1})\|^2 \quad (4.43)$$

と設定する。この評価関数を最小化することでパラメータとその誤差共分散の同定を行う。これはパラメータ誤差に関する感度を重みとした重み付き最小二乗問題であり、周期運動や静力学解析、フィードフォワードトルクに大きな影響を与えるものを特に精度良く同定することを狙ったものである。式 (4.43) の右辺第 3 項、第 4 項が繰り返し計算の安定化のために追加した項である。これにより更新前後のパラメータ、フィードフォワードトルクの大きな変化を抑制する。なお、 w_d , w_s , w_τ , δ は重みであり、実験的に決定し、 $w_d = 1$, $w_s = 100$, $w_\tau = 10^{-4}$, $\delta = 10^{-4}$ を用いた。式

(4.43) を行列形式に書き換えると

$$J_{Ic} = \left\| \begin{bmatrix} \sqrt{\delta} S_\tau & O & \cdots & O \\ O & S & \cdots & O \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O & O & \cdots & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0^k \\ \Delta \mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{p}_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sqrt{\delta} S_\tau \mathbf{p}_0^{k-1} \\ O \\ \vdots \\ O \end{bmatrix} \right\|^2 = \|\mathbf{S}\mathbf{P}^k - \mathbf{O}\|^2 \quad (4.44)$$

$$S = \begin{bmatrix} \sqrt{w_d} S_{dy} \\ \sqrt{w_s} S_{sy} \\ \sqrt{w_\tau} S_\tau \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

となる．このとき， $\mathbf{P}^k$ は同定データが与えられたとき，式 (4.17) から，

$$\mathbf{P}^k = \mathbf{A}_p^\# \mathbf{B}_p + \mathbf{A}_p^\perp \boldsymbol{\alpha}_k \quad (4.46)$$

となる．そして，式 (4.44) を最小化する $\boldsymbol{\alpha}_k$ は，

$$\boldsymbol{\alpha}_k = (\mathbf{S}\mathbf{A}_p^\perp)^\# (\mathbf{O} - \mathbf{S}\mathbf{A}_p^\# \mathbf{B}_p) \quad (4.47)$$

となる．これを式 (4.46) に代入し，繰り返し計算を行うことで感度解析に基づく最適なパラメータが得られる．これは図 4.1 の赤い楕円で表される所望の誤差共分散を $(S^T S)^{-1}$ としてパラメータとそのばらつきを同定したことに相当する．

4.5 実験検証

4.5.1 実験装置の構成

実験に用いるロボットは 3.6.1 項で述べたものと同じロボットである．図 4.2 に示す．パラメータ同定の際にエンコーダで取得できる角度データの他に，角速度，角加速度のデータが必要となるが，これは角度データに対して零位相差フィルタを施すことで得た．

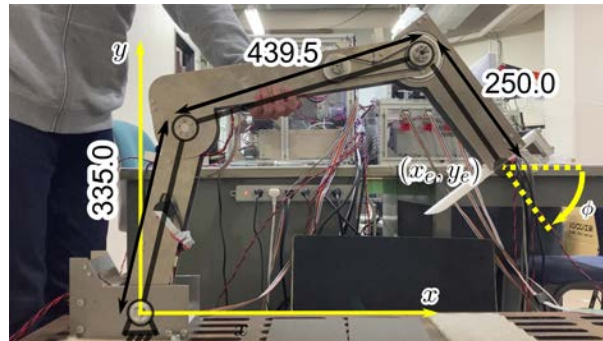


Fig.4.2: 3-link planar manipulator used in the experiment.

4.5.2 検証動作

今回実験で行う動作は式 (4.18) の動作であり．ロボット手先角度 ϕ を下向きである $-\pi/2$ rad に保った状態でロボットが動作できる範囲を図 4.3 に示す．薄い灰色の範囲が可動域である．この中の濃い灰色の四角の範囲，

$$325 \text{ mm} \leq x^r \leq 525 \text{ mm} \quad (4.48)$$

$$50 \text{ mm} \leq y^r \leq 250 \text{ mm} \quad (4.49)$$

において，50 mm 間隔で周期運動の中心位置を変えて感度解析・パラメータの同定を行い提案手法の有効性を検証する．目標動作は振幅 $a = 20 \text{ mm}$ ，角周波数 $\omega = 2\pi \text{ rad/s}$ を用いた．

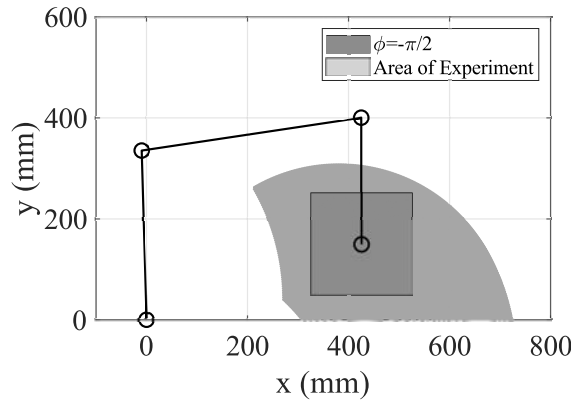


Fig.4.3: Robot range of motion and the workspace where experiments were conducted.

4.5.3 パラメータの同定

同定データは，

1. パラメータに不定な解が現れないような PE 性を有する動作
2. 周期的な運動を対象とした同定であるため，その周期運動に近い動作
3. 周期運動が重力の影響を大きく受けるため重力項を正確に同定するための準静的動作

の 3 種類の目標動作を与えて取得する．動作の計測はフィードバック制御，

$$\tau_k = K_p(\theta_k^r - \theta_k) + K_d(\dot{\theta}_k^r - \dot{\theta}_k) \quad (4.50)$$

により行い，計測する動作に合わせて適切に比例ゲイン K_p ，微分ゲイン K_d を設定した．

例として，周期運動の中心位置を $(x^r, y^r) = (425 \text{ mm}, 150 \text{ mm})$ として感度解析を行い，パラメータ同定を行った結果を表 4.1 に示す．比較のため，CAD によるパラメータ計算値，最小二乗法によるパラメータ同定結果も示した．最小二乗法では全体的に CAD での計算値と近い値が得られて

いる．提案手法では第 3 リンクの慣性パラメータ p_3 が負で得られていることや，第 3 軸の粘性摩擦項 p_{12} のオーダーが第 1, 2 軸の p_{10} , p_{11} と大きく異なるような結果が得られており，多くのパラメータが CAD 計算値から離れている．

CAD 計算値や最小二乗法による同定結果から大きく異なるパラメータは制御に悪影響を及ぼすように思われるが，例えば，実験に用いた周期運動では第 3 リンクが回転しない運動であるため，第 3 リンクの慣性パラメータ p_3 は影響を与えない．提案手法では p_3 のように直感的に理解できるパラメータ以外にも，感度解析により制御に影響を与えるパラメータ，与えないパラメータの重要度を評価でき，その評価に基づいて同定を行っている．また，式 (4.25) に示すように PD 制御でフィードバックを行っていることを前提として同定を行っており，運動方程式にもフィードバックゲインが含まれているため，想定される値と異なるパラメータであっても目的の周期運動にはあまり悪影響を与えないものと考えられる．

Table 4.1: Minimum set of dynamics parameter identification results using the proposed method.

Parameter	CAD data	Least Mean Square	Proposed method
p_1	4.78×10^{-1}	9.73×10^{-1}	9.17×10^{-1}
p_2	4.01×10^{-1}	7.41×10^{-1}	1.47
p_3	1.81×10^{-2}	5.77×10^{-1}	-1.04
p_4	1.49	1.29	1.25
p_5	1.81×10^{-3}	6.78×10^{-2}	6.44×10^{-2}
p_6	9.99×10^{-1}	9.87×10^{-1}	8.46×10^{-1}
p_7	3.73×10^{-2}	5.77×10^{-3}	-5.16×10^{-1}
p_8	8.31×10^{-2}	5.95×10^{-2}	5.96×10^{-1}
p_9	1.47×10^{-2}	2.90×10^{-3}	-2.85×10^{-3}
p_{10}	—	5.46	6.12
p_{11}	—	4.03	6.30
p_{12}	—	1.77	2.00×10^1
p_{13}	—	1.92	3.01
p_{14}	—	2.79	2.29
p_{15}	—	2.16	6.33×10^{-1}

4.5.4 実験結果および考察

実験はフィードフォワードとフィードバック制御，

$$\tau_k = \tau_k^r + K_p(\theta_k^r - \theta_k) + K_d(\dot{\theta}_k^r - \dot{\theta}_k) \quad (4.51)$$

$$K_p = J^T K_x J \quad (4.52)$$



により行った．実験中の比例ゲイン K_p はコンプライアンス制御のように手先に均一にフィードバックトルクが加わるよう，ヤコビ行列 J を用いて動作中に変化するように設定する．実験では，

$$K_x = \begin{bmatrix} 9000 & & O \\ & 9000 & \\ O & & 450 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

$$K_d = \begin{bmatrix} 50 & & O \\ & 50 & \\ O & & 20 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

を用いた．

例として，周期運動の中心位置を $(x^r, y^r) = (425 \text{ mm}, 150 \text{ mm})$ とし，表 4.1 のパラメータからフィードフォワードトルクを設計して動作した結果を図 4.4 に示す．青破線が最小二乗法，赤実線が提案手法により制御した結果であり，黒実線は目標軌道を表す．それぞれの軌道の誤差は 1 mm 以内であるため， y 方向は 5 倍して表示した．多くの場所で提案手法が最小二乗法の結果より目標軌道に近いことがわかる．また，目標軌道との誤差を評価した結果を図 4.5 に示す．(a) は誤差軌道を表しており，赤実線の提案手法が最も y 方向誤差を低減できていることが確認できる．(b)，(c) はそれぞれ周期運動 5 周期分の x 方向誤差の二乗和， y 方向誤差の二乗和の計算結果を示している．この結果から定量的にも提案手法 (PM) が最小二乗法 (LMS) と比較して y 方向誤差が低減していると示しており，図 4.5 での往復動作におけるヒステリシス様の差も提案手法の方が低減されていることがわかる．このことは，提案手法によってこの中心位置における周期運動に適したパラメータが同定されたことが示唆している．また， x 方向についても提案手法は最小二乗法と比較して誤差が低減されていることを示している．

さらに，周期運動の中心位置を変えて検証領域全体を最小二乗法，提案手法で制御し，図 4.5 の (b)，(c) の評価を行った結果を図 4.6，図 4.7 と図 4.9，図 4.10 に示す．図 4.6 図 4.7 ではすべての格子点について，そこを周期運動の中心として感度解析，パラメータ同定を行い，フィードフォワード入力を求める実験を 25 回実施した結果である．一方，すべての位置における周期運動に対して毎回パラメータ同定を行うことは現実的ではない．そこで，図 4.9，図 4.10 では中心の 1 点を代表点としてパラメータ同定を行い，フィードフォワードトルクを求め，これが周辺の領域に対してどの程度有効になるかを調べた結果である．(a) は最小二乗法，(b) は提案手法のフィードフォワードトルクにより制御した結果であり，(c) は (a)，(b) の評価の差を取ったものである．(c) の縦軸が正で現れている部分が提案手法が有利な領域であり，図 4.6 図 4.7 では x 方向， y 方向ともにほとんどの領域で誤差が低減していることが確認できる．考慮していない x 方向の誤差が低減されるのは， y 方向の誤差を抑制するフィードフォワードトルクが全体的に誤差を小さくするよう作用したと考えられる．また，周期運動の中心位置を $(x^r, y^r) = (525 \text{ mm}, 250 \text{ mm})$ と設定して動作した結果のみ提案手法が大きく悪化している．このときの周期運動両端の姿勢を図 4.8 に示す．今回実験で用いた周期運動では，第 3 リンクが常に下向きとなり，第 2 軸が一直線になると特異姿

勢となる。このとき感度も特異になり、今回はそれに近い感度が同定結果に悪影響を与えたものと考えられる。この影響を低減するためには、特異姿勢においては他の評価を加えることなどが必要と思われる。

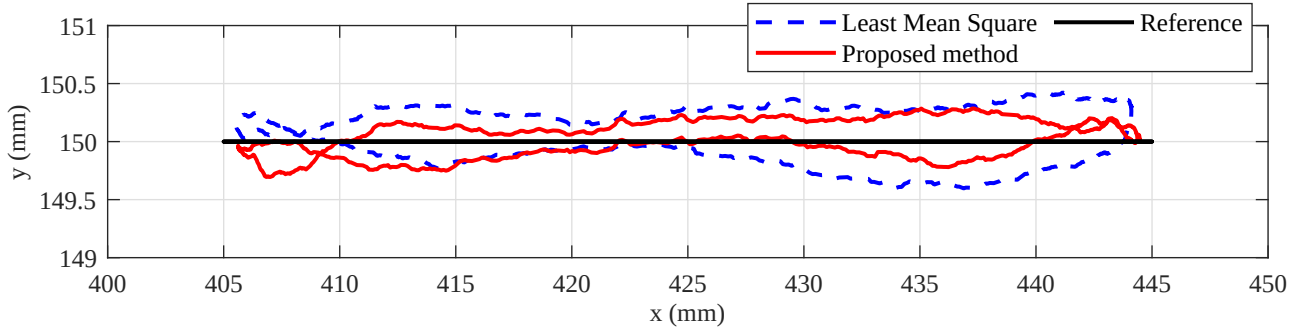


Fig.4.4: Weaving motion trajectory.

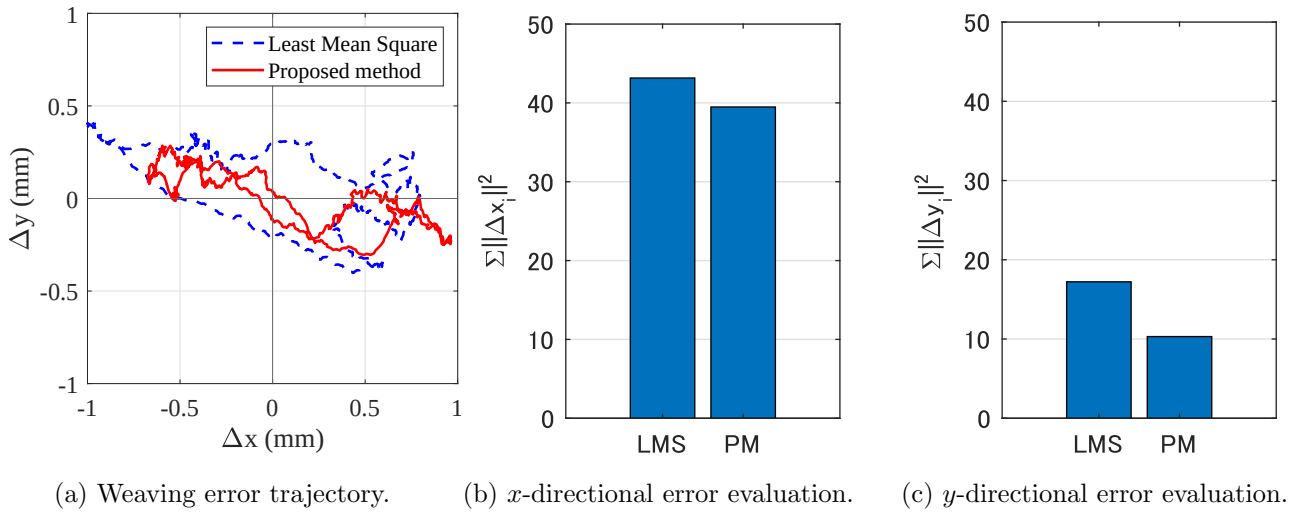


Fig.4.5: Weaving motion error trajectory.



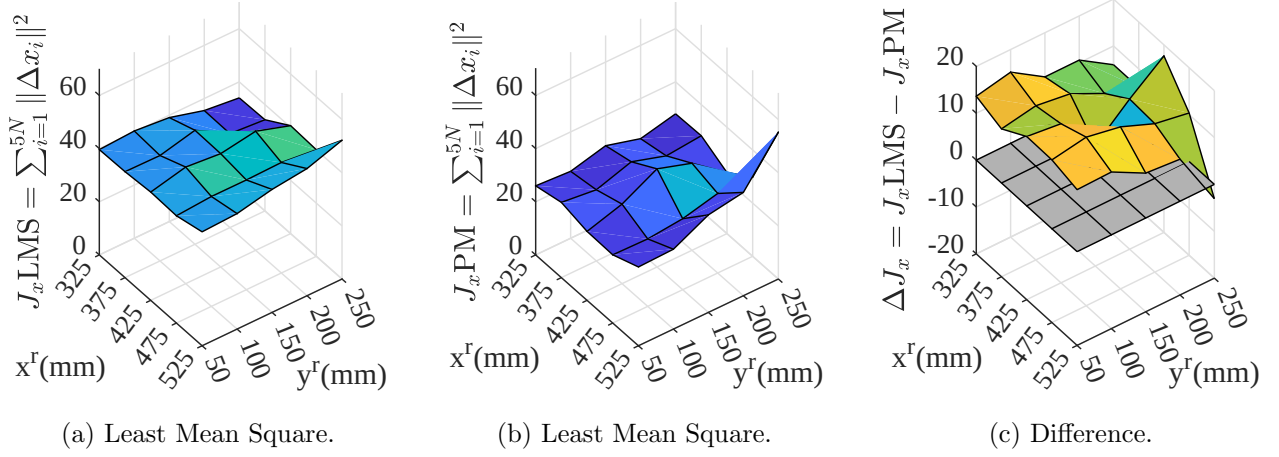
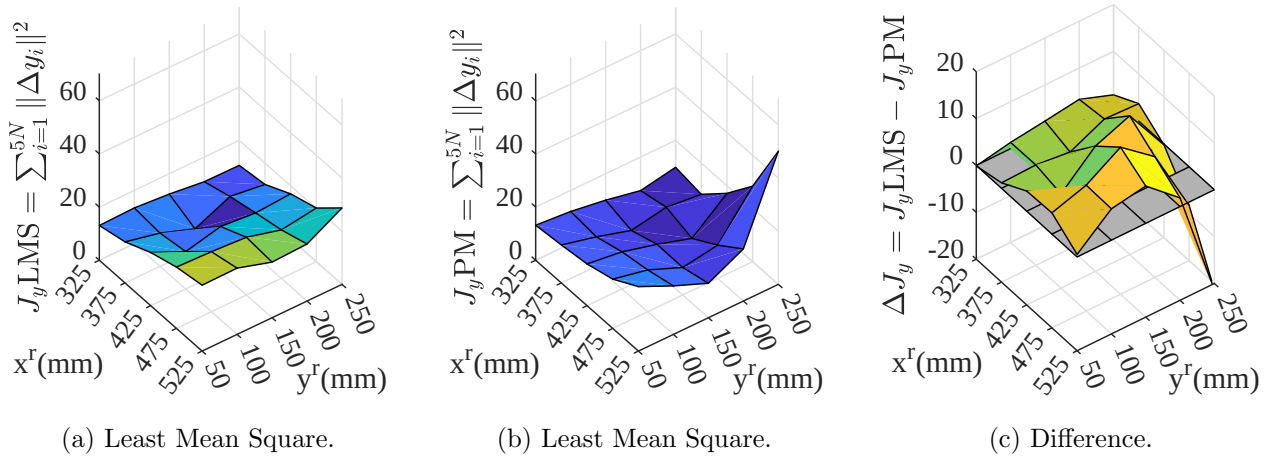
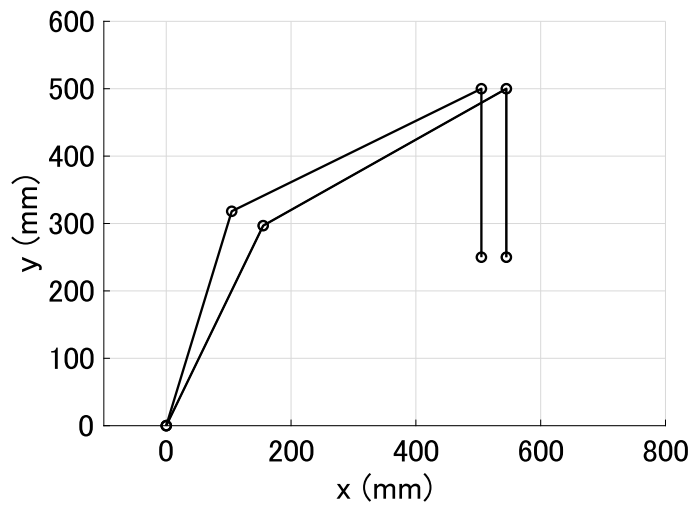
Fig.4.6: x -directional error map.Fig.4.7: y -directional error map.Fig.4.8: Weaving both ends posture at $(x^r, y^r) = (525 \text{ mm}, 250 \text{ mm})$.

図 4.9, 図 4.10 は表 4.1 に示す 実験領域の中心のパラメータを使用して誤差マップを作成した結果を示す. 図 4.10(d) は (c) を x^r - y^r 平面に投影した図であり, 赤丸は代表点として用いた位置を表している. カラーマップの明るい部分は格子点において提案手法が有利な範囲, 暗い部分は最小二乗法が有利な範囲を示す. x 方向の誤差は図 4.6 と同様に, $(x^r, y^r) = (525 \text{ mm}, 250 \text{ mm})$ の部分を除けば提案手法が有利となっている. y 方向の誤差は $425 \text{ mm} \geq x^r \geq 525 \text{ mm}$, $150 \text{ mm} \geq y^r \geq 200 \text{ mm}$ で提案法が有利となっている. ロボットの姿勢が類似した代表点付近では提案法で同定したパラメータの効果が有効であると思われるが, その範囲は限定的であった. これは代表点の近傍では手先位置の変化に対し, 各関節角度の変動が比較的すくなく, 各リンクの姿勢が類似しその結果各感度も類似した傾向にあるためと思われる. より広い範囲で有効なパラメータを得るためには, 複数の点の感度を同時に考慮してパラメータを同定する方法も考えられるが, 考慮する感度の量が多くなるとより大きな行列の擬似逆行列計算が必要となり, 計算処理の高速化が課題となる.

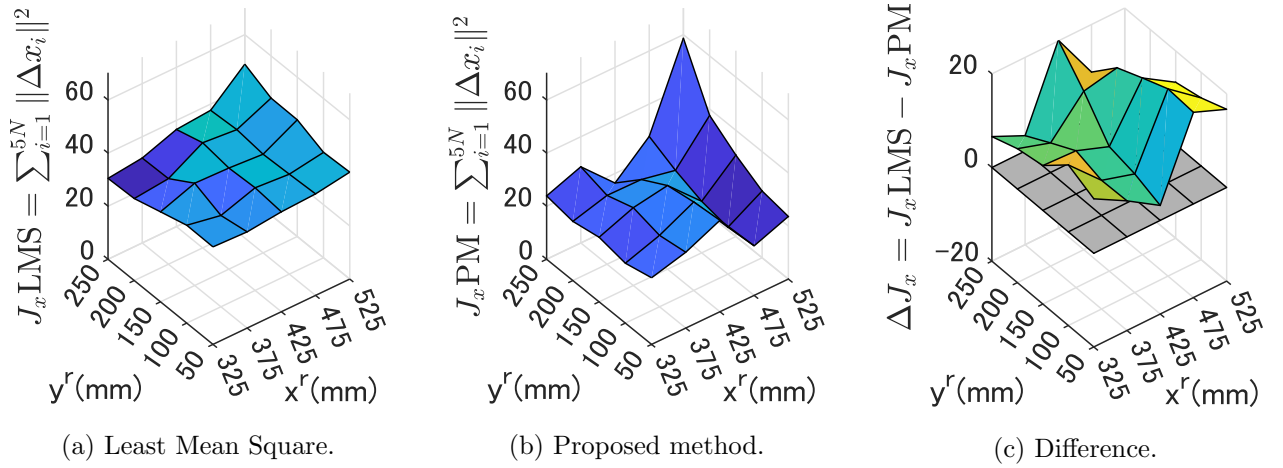
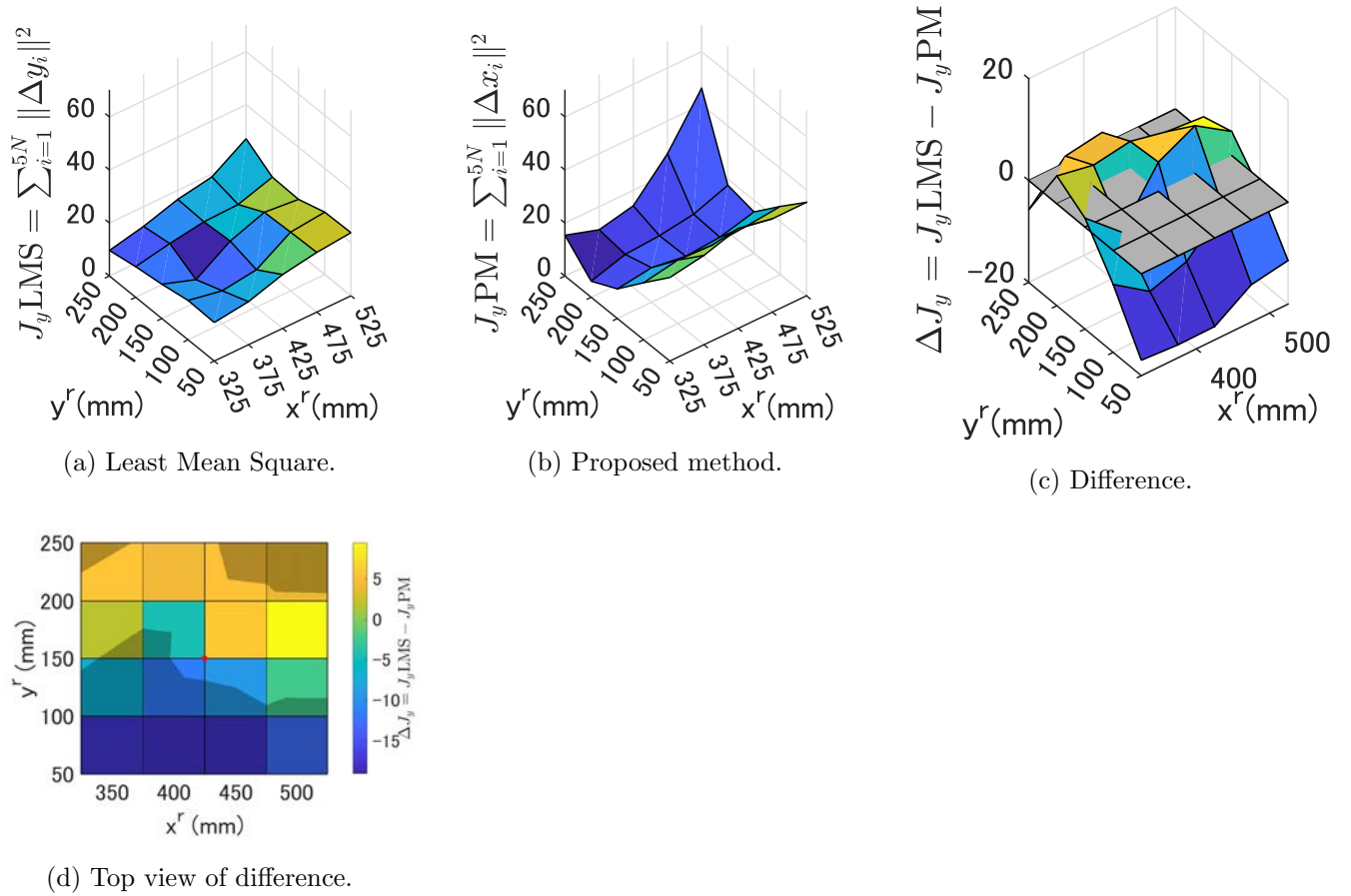


Fig.4.9: x -directional error map based on $p_{(425,150)}$.

Fig.4.10: y -directional error map based on $p_{(425,150)}$.

4.6 おわりに

本章では、周期運動における最小動力学パラメータの手先鉛直方向ずれに対する動的感度に加え、主に重力影響を考慮する静的な感度、繰り返し計算精度とパラメータ同定における正規化に相当するランク落ち抑制に効果のあるフィードフォワードトルクの感度を考慮することで、動作改善を行った。前章のクーロン摩擦での補償から動力学パラメータ全体へと対象を拡張し、運動における動的感度を用いた動作改善を実施した結果、上記の効果を得ることができた。このことからロボットの動作改善に感度を考慮することは有効であるといえる。

第5章

独立画像計測による関節角度原点誤差の高精度 同定

5.1 はじめに

前章までは、運動中の誤差に対する感度を最小化するパラメータを求めることで運動の改良を行った。本章では、ロボットの機体差すなわち関節角度原点誤差（関節角度の零点調整誤差）に注目し、感度に基づいて同定しやすい軌道を設定する。感度を利用して同定用軌道の評価・選択を行っている従来研究として、パラレルリンクロボットであるデルタロボットを対象したものがある[73][74]。デルタロボットでは同定すべき機構パラメータが極めて多く、単純な軌道を用いた場合、PE 性の問題からパラメータが正しく求まらないため、感度行列の条件数から同定用軌道の評価と選択を行っているが、評価を満足されない場合は再選択し、データ数を増やすことに留まっている。一方、生産現場で利用されているロボットに対し現場で同定を行うことを想定すると、民生用カメラなどを用いた簡易で、短時間の計測が必要である。アーク溶接ロボットのようなシリアルリンクロボットの関節原点誤差を計測対象と想定した場合、パラメータ数が比較的少ないため、短時間で計測する軌道の設計が可能となり、また、各パラメータからの影響を考慮した軌道設計が可能になる。また、民生用カメラを利用した簡易な計測を行う場合、データの時間的マッチングが取れないため、これを考慮した手法が必要であるが、これもパラメータ数が限定されれば計算が可能となる。

そこで本章では、関節角度原点誤差の手先位置誤差に対する感度に着目し、デジタルカメラなどで撮影した手先位置の動画を用いて簡易に関節角度原点誤差を計測できるように、手先誤差が拡大する軌道を設計して関節角度原点誤差を同定する手法を提案し、実験用ロボットを用いて有効性を検証する。これは感度を最大化することで誤差を拡大して計測しやすくすることに相当する。



5.2 関節角度原点誤差に対する手先誤差感度解析

5.2.1 問題設定

本章では、ロボット個体ごとに異なる関節角度原点誤差が手先位置決めに与える影響を低減するために、ロボットの一連の運動を簡易なカメラで撮影し、そのデータから関節角度原点誤差を同定することを考える。計測時間が長く、複数回数に渡ると計測の簡易性が低下するため、一連の動作を計測した結果を用いて同定が完了することを考える。その際、システムの簡易性から以下を条件とする。

- (a) カメラの内部パラメータ（焦点距離やレンズの歪み収差）は既知であるが、外部パラメータ（対象との相対位置・姿勢）の精密なキャリブレーションはできていない
- (b) ロボット制御系とカメラの時刻が同期していないうえ、サンプリングタイムが異なる

ロボットを工場などで動作させる環境において、ロボットとカメラの正確な相対位置関係をキャリブレーションすることは困難であるが、カメラの内部パラメータのキャリブレーションは事前に実施可能である。(a)はこの状況を示す条件である。一方、ロボットの制御系のサンプリングタイムと映像のサンプリングタイムは大きく異なる場合が多く、また時間の同期を取ることが難しい。(b)はこの状況を示す条件である。さらに、条件(b)のもとで関節角度原点誤差のキャリブレーションを行うために、以下の(i)~(iii)を行う。

- (i) ロボットの動特性が現れないよう、低速で動かす
- (ii) 関節角度原点誤差の影響が軌道の法線方向に現れるように軌道を設計する
- (iii) カメラ撮影タイミングに相当するロボット制御系での時刻を推定する

平面 3 リンクマニピュレータは 3 つのアクチュエータを持つので、関節角度原点誤差を求める場合、最低 2 つの姿勢での手先位置計測（それぞれ x と y 座標、合計 4 つの情報）が必要であるが、手先位置の計測にはロボット原点を基準とした絶対座標での厳密なキャリブレーションが必要となる。そこで、求めた感度が大きくなる点を含めた軌道全体の多数の点を利用することによって誤差の影響を低減し、簡易なキャリブレーションで高精度な計測を行えるようにする。ここで、手先速度を連続的に変化させて移動できるなめらかな軌道であること、カメラ地面に対する回転・位置ずれ補正を行うことができることから、軌道には楕円を採用する。楕円軌道の設計はまず楕円上の感度が最大化した 3 点を求め、3 点を通りロボットがなめらかに移動できる楕円を求める。さらに、カメラで手先位置が撮影された時刻とエンコーダ値で関節角度を計測した時刻のずれを推定しつつ、関節角度誤差を同定する。

問題 (a) で述べたように、カメラの外部パラメータの精密なキャリブレーションはできていないが、図 5.1 のように、軌道が楕円であれば、計測された軌道の中心からカメラ位置のキャリブレーションを、楕円の主軸の方向からカメラ姿勢のキャリブレーションを行うことができる。軌道が楕

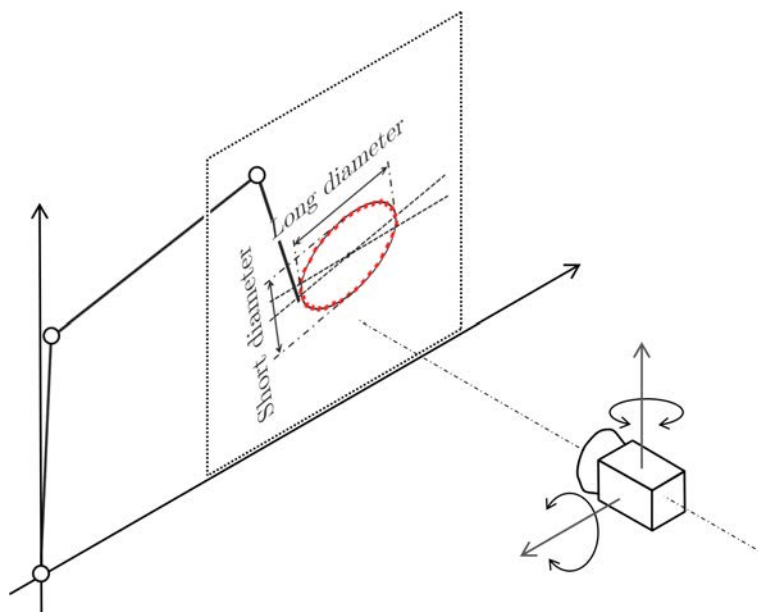


Fig.5.1: Concept of camera external parameter calibration using elliptical paths.

円で $\Delta\theta$ が十分に小さいとすると、カメラで計測した軌道はほぼ楕円を描くため、楕円の当てはめを行うことでその長軸・短軸の長さ・傾きを知ることができる。カメラのパン・チルト・ロールのうち、2自由度分はこの長軸短軸長さ比と傾きからキャリブレーション可能である。そこで、ロール回転のずれを水準器を用いるなどして補正しておけば、パン・チルト回転についてはキャリブレーションすることができる。さらに回転の補正を行った後の長軸短軸の長さを利用すれば、カメラ画像上の 1 pixel がロボット座標上で何 mm 相当かを計算できるため、スケール変換が可能であり、設置距離のキャリブレーションが可能となる。すなわち、カメラの内部パラメータが既知のとき、手先軌道を楕円とすることで、カメラの外部パラメータがキャリブレーションできる。

以下では、(ii) が満たされる軌道を設計する。また、(a) の画像内での撮影位置のずれと (iii) のカメラ撮影タイミングとロボット制御系時刻の推定について述べる。

5.2.2 関節角度原点誤差と手先誤差の関係

本章では、提案手法の有効性を確認するために図 2.1 に表す平面 3 リンクマニピュレータを用いて検討を行う。関節角度誤差と手先誤差の関係は式 (2.6) のように表すことができる。ここで式 (2.5) のヤコビ行列 $\mathbf{J}$ を縦ベクトルで分割して表記すると、

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{\theta_1} & \mathbf{J}_{\theta_2} & \mathbf{J}_{\theta_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

で表すことができる。

5.2.3 関節角度原点誤差に対する手先誤差感度

ロボットの手先がある軌道上を移動するとき、その軌道上の点 p_i とその点で $\Delta\theta_i$ が手先誤差に与える影響を考える。図 5.2 のように、関節角度原点誤差によって手先位置に誤差が発生する場合

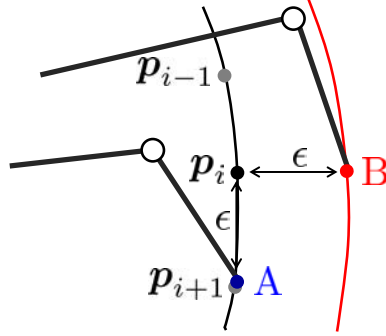


Fig.5.2: Difference between tool position error appearing in the tangential direction and the normal direction of the reference trajectory.

の誤差の方向を考える。点 p_i を通る黒の曲線は目標軌道を表す。時刻 i において、 p_i を目標位置として与えた場合、関節角度原点誤差の影響で大きさ ϵ の手先誤差が発生するものとする。ここで、誤差が軌道の接線方向に発生した場合 A と法線方向に現れた場合 B を考える。問題設定 (b) で述べたとおりロボット制御系とカメラの時刻は同期していないため、A のずれが発生した場合、

- A の時刻は i であり手先誤差は $A - p_i$ である
- A の時刻は $i + 1$ であり、手先誤差は $A - p_{i+1}$ である

のいずれであるかの区別がつきにくい。これに対し、B のように法線方向に手先誤差が現れる場合には明確に手先位置ずれとして計測できる。そこで、赤線のように誤差の影響が法線方向となる軌道を描くような目標軌道を設計し、それを用いて計測を行う。そのため、 p_i における法線方向の手先ずれについて考える。 p_i での軌道の単位法線ベクトルを n_i とすると、法線方向の手先ずれの大きさの二乗は式 (5.1) の $J_{\theta 1}$, $J_{\theta 2}$, $J_{\theta 3}$ を用いて、

$$(n_i^T \Delta x)^2 = (n_i^T J_{\theta 1} \Delta \theta_1 + n_i^T J_{\theta 2} \Delta \theta_2 + n_i^T J_{\theta 3} \Delta \theta_3)^2 \quad (5.2)$$

で表される。ただし、 n_i は運動を行う平面上にある。以下では、 p_1 では $\Delta\theta_1$ の影響が、 p_2 では $\Delta\theta_2$ の影響が、 p_3 では $\Delta\theta_3$ の影響が大きくなるよう検討を行う。式 (5.2) から p_1 法線方向の手先ずれの大きさの $\Delta\theta_1$ に関する感度は、

$$\frac{\partial (n_1^T \Delta x)^2}{\partial \Delta \theta_1} = 2j_1^1 j_1^1 \Delta \theta_1 + 2j_1^1 j_2^1 \Delta \theta_2 + 2j_1^1 j_3^1 \Delta \theta_3 \quad (5.3)$$

$$j_k^i = n_i^T J_{\theta k} \quad (5.4)$$

と求めることができ、 $\mathbf{p}_2$ での $\Delta\theta_2$ 、 $\mathbf{p}_3$ での $\Delta\theta_3$ についても同様に

$$\frac{\partial(\mathbf{n}_2^T \Delta \mathbf{x})^2}{\partial \Delta \theta_2} = 2j_2^2 j_1^2 \Delta \theta_1 + 2j_2^2 j_2^2 \Delta \theta_2 + 2j_2^2 j_3^2 \Delta \theta_3 \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial(\mathbf{n}_3^T \Delta \mathbf{x})^2}{\partial \Delta \theta_3} = 2j_3^3 j_1^3 \Delta \theta_1 + 2j_3^3 j_2^3 \Delta \theta_2 + 2j_3^3 j_3^3 \Delta \theta_3 \quad (5.6)$$

と求めることができる。

5.3 関節角度原点誤差が拡大する軌道の設計と測定方法

5.3.1 関節角度原点誤差が拡大される楕円上の点

$\mathbf{p}_1$ では $\Delta\theta_1$ の影響が、 $\mathbf{p}_2$ では $\Delta\theta_2$ の影響が、 $\mathbf{p}_3$ では $\Delta\theta_3$ の影響が大きくなるように計算する。はじめに、 $\mathbf{p}_1$ で $\Delta\theta_1$ に対する法線方向の手先ずれの感度を最大化することを考える。ここで、式(5.3)の右辺第1項は $\Delta\theta_1$ による手先誤差への影響であるためこれは大きくしたい。第2項以降は $\Delta\theta_2$ 、 $\Delta\theta_3$ の影響であるため、これを小さくし $\Delta\theta_1$ の影響だけが大きく現れるように感度を最大化する。そこで、 $\mathbf{p}_1$ の評価関数を、

$$J_{p1} = +(j_1^1 j_1^1)^2 - (j_1^1 j_2^1)^2 - (j_1^1 j_3^1)^2 \quad (5.7)$$

とし、これを最大化する。 $\mathbf{p}_2$ 、 $\mathbf{p}_3$ についても同様に

$$J_{p2} = -(j_2^2 j_1^2)^2 + (j_2^2 j_2^2)^2 - (j_2^2 j_3^2)^2 \quad (5.8)$$

$$J_{p3} = -(j_3^3 j_1^3)^2 - (j_3^3 j_2^3)^2 + (j_3^3 j_3^3)^2 \quad (5.9)$$

とする。

楕円を長径・短径 r_1 、 r_2 、中心 $\mathbf{x}_c$ と媒介変数 ϕ を用いて表し、楕円上の点 $\mathbf{p}_1$ 、 $\mathbf{p}_2$ 、 $\mathbf{p}_3$ は、ロボット手先姿勢 ψ_i を用いて、

$$\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} r_1 \cos \phi_i \\ r_2 \sin \phi_i \\ \psi_i \end{bmatrix} + \mathbf{x}_c \quad (5.10)$$

$$\mathbf{x}_c = \begin{bmatrix} x^c \\ y^c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

と表した。つまり、設計変数は、

$$r_1, r_2, x^c, y^c, \phi_1, \phi_2, \phi_3, \psi_1, \psi_2, \psi_3 \quad (5.12)$$

の10個であり、 $\mathbf{p}_1$ 、 $\mathbf{p}_2$ 、 $\mathbf{p}_3$ が決定されれば、その点での関節角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 は逆運動学解析により一意に決定される。



楕円中心が大きく移動すると、目標位置・姿勢が可動範囲外になるなどの懸念があるため、楕円中心 $\mathbf{x}_c$ が初期値 $\mathbf{x}_c^o$ から大きく変化しないことも条件に加え、

$$J_e = \sum_{i=1}^3 J_{pi} - \delta_c \|\mathbf{x}_c - \mathbf{x}_c^o\|^2 \quad (5.13)$$

を評価関数とし、これを最大化する。 δ_c は右辺第 1 項と第 2 項の次元の違いによる影響を調整する係数であり、以降の計算では 1 とした。これに加えて、各関節角度 θ_i が可動範囲 $\theta_i^L \leq \theta_i < \theta_i^U$ 内であることを制約条件とするため、ペナルティ関数を用いて可動範囲の制約を設けた。これを勾配法で解くことによって、 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3$ を決定する。なお、 $\mathbf{J}_{pi}$ は式 (5.7)~(5.9) で定義され、 $\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \boldsymbol{\theta}_3$ でパラメタライズされる。

5.3.2 計測用の手先誤差を拡大する軌道の算出

次に求まった楕円上の軌道を考える。楕円上にロボットが各時刻で移動する点を N 点配置し、各点の場所を k で表す。 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3$ は位置を固定するため、 k が k_{p1} 番目、 k_{p2} 番目、 k_{p3} 番目の位置に配置して変化させない。それ以外の点は関節角加速度が連続的に変化するように調整する。そのため評価関数を

$$J_i = \|W\boldsymbol{\Theta}\|^2 \quad (5.14)$$

$$W = \begin{bmatrix} W_v \\ W_a \\ W_c \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

とした。 W は関節角速度を計算する重み W_v と、関節角加速度を計算する重み W_a 、関節可動範囲内を表すペナルティ関数の計算結果 W_c によって構成する。ただし、 $\boldsymbol{\Theta}$ は手先が楕円上 $\mathbf{p}_k$ に位置するときの関節角度の一つの解を $\boldsymbol{\theta}_k^r$ として、

$$\boldsymbol{\Theta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_1^{rT} \\ \vdots \\ \boldsymbol{\theta}_N^{rT} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

で定義する。ここで、手先の姿勢は自由に決定できるとすると、手先姿勢を変更しても手先位置が $\mathbf{p}_k$ と一致する関節角度は

$$\bar{\boldsymbol{\theta}}_k = \boldsymbol{\theta}_k^r + \mathbf{J}_k^\perp \boldsymbol{\alpha}_k \quad (5.17)$$

となり、まとめて

$$\bar{\boldsymbol{\Theta}} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{\theta}}_1^{rT} \\ \vdots \\ \bar{\boldsymbol{\theta}}_N^{rT} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

と書くことができる． α_k は $\mathbf{J}_k$ の零空間基底からなる行列の係数ベクトルである．これから J_i は

$$\bar{J}_i = \|W(\Theta + \mathbb{J}_d \mathbf{A})\|^2 \quad (5.19)$$

になる．ただし，

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_1^T \\ \vdots \\ \alpha_N^T \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

とし，

$$\mathbb{J}_d = \begin{bmatrix} \delta_1 \mathbf{J}_1^\perp & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \delta_2 \mathbf{J}_2^\perp & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \delta_N \mathbf{J}_N^\perp \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

$$\delta_i = \begin{cases} 0 & (k = k_{p1}, k = k_{p2}, k = k_{p3}) \\ 1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5.22)$$

として， $\mathbf{p}_1 \sim \mathbf{p}_3$ の位置を固定する．式 (5.19) を最小化する $\bar{\Theta}$ は，

$$W\bar{\Theta} + W\mathbb{J}_d \mathbf{A} = 0 \quad (5.23)$$

$$\mathbf{A} = -(W\mathbb{J}_d)^\# W\bar{\Theta} \quad (5.24)$$

を満たす．式 (5.23)，式 (5.24) の $\mathbb{J}_d$ は $\bar{\Theta}$ を含むため，更新幅 δ_d を用いて，

$$\bar{\Theta} \leftarrow \bar{\Theta} + \delta_d \mathbb{J}_d \mathbf{A} \quad (5.25)$$

と繰り返し計算で $\bar{\Theta}$ を求める．なお， $\bar{\Theta}$ の更新により手先位置が楕円上から逸脱するため，

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{p}_1^T \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

$$\bar{\Theta} \leftarrow \bar{\Theta} + \delta_J \mathbb{J}_d^\# (\bar{\mathbf{P}} - \mathbf{P}) \quad (5.27)$$

と随時補正を加えた． $\bar{\mathbf{P}}$ は $\bar{\Theta}$ を式 (2.1) で順運動学変換したものとした．また， δ_J は補正の更新幅であり， $\delta_J = 1$ とした．

算出した目標軌道を図 5.3, 図 5.4 に示す．楕円上に配置した点数は $N = 180$ とした．図 5.3 の黒線が計算された楕円であり，楕円上の赤・緑・青の点はそれぞれ， $\Delta\theta_1$ ， $\Delta\theta_2$ ， $\Delta\theta_3$ の影響が軌道の法線方向に最大となる点 $\mathbf{p}_1$ ， $\mathbf{p}_2$ ， $\mathbf{p}_3$ を表し，折れ線は各点でのロボット姿勢を表している．矢印は式 (5.1) の J_{θ_1} ， J_{θ_2} ， J_{θ_3} を表しており，それぞれ $\Delta\theta_1$ ， $\Delta\theta_2$ ， $\Delta\theta_3$ の手先ずれへの影響が軌道



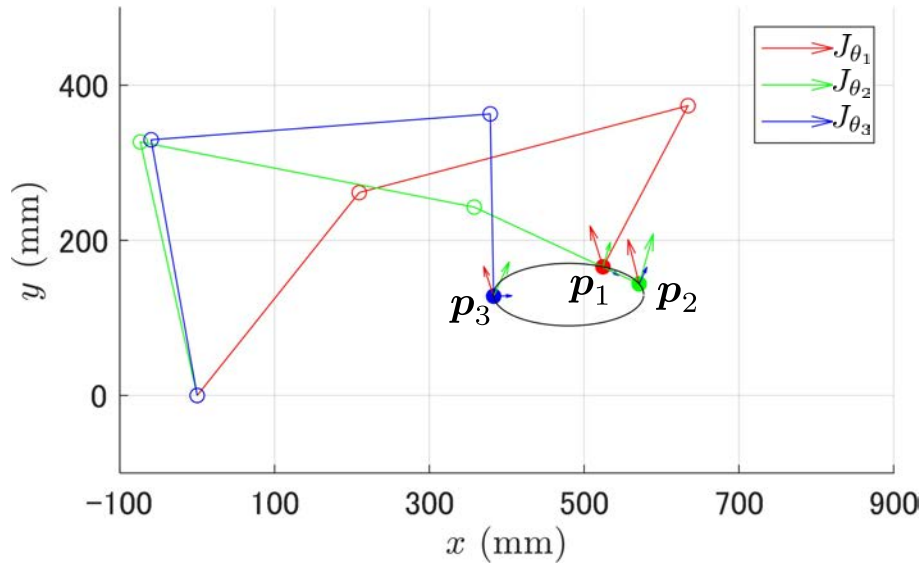


Fig.5.3: Calculation of measurement trajectories.

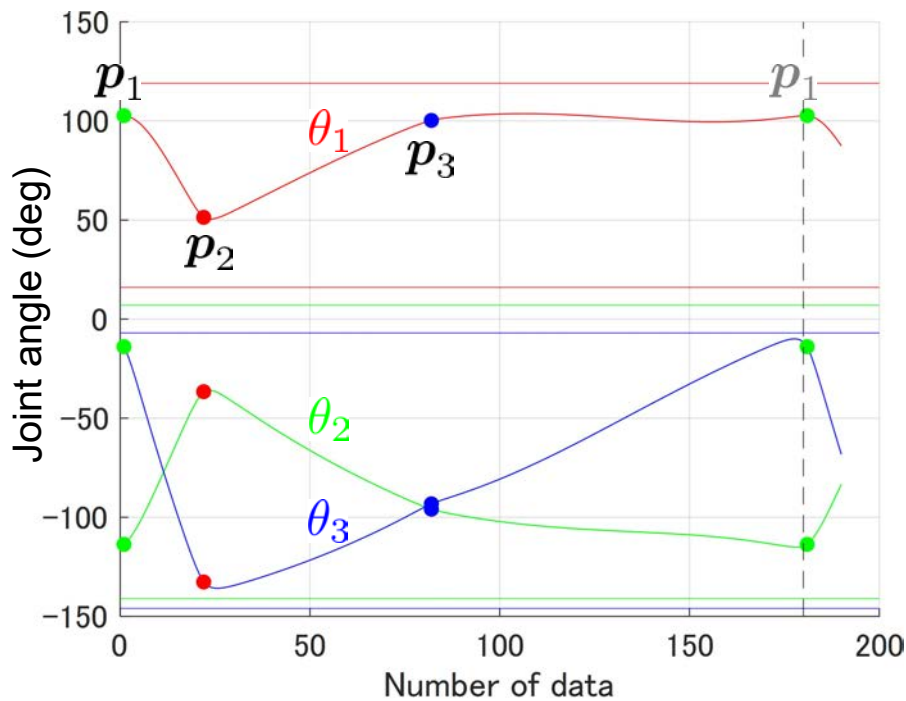


Fig.5.4: The trajectories of each joint angle moving on the ellipse connecting the three points.

の法線方向に大きくなる点を得られている。図 5.4 は 3 点を結ぶ楕円上を移動する各関節角度の軌道である。赤の曲線が θ_1 、緑の曲線が θ_2 、青の曲線が θ_3 の軌道を表しており、直線はそれぞれ θ_1 、 θ_2 、 θ_3 の可動範囲の上限と下限を表している。赤・緑・青の点は、図 5.3 の楕円上の点と対応している。関節角度が、なめらか、かつ可動範囲内となる軌道が生成されていることがわかる。縦の破線は ϕ が 2π rad 相当の位置を表しており、 ϕ が 2π rad 前後でも軌道の連続性が保たれていること

がわかる。

5.3.3 撮影タイミングずれを考慮した関節角度原点誤差同定

動画で撮影された手先軌道 x^c と、エンコーダ値をもとに順運動学解析で求めた手先位置 x^e から、関節角度原点誤差 $\Delta\theta$ を同定する。手先位置から θ を求めるには手先の姿勢が必要であるが、 θ を既知とし、そこからのずれ $\Delta\theta$ を求める場合、 θ が特異姿勢でなければ、2点以上の手先位置のずれ量から $\Delta\theta$ を計算することができる。しかし、問題 (b) で述べたように、動画の各フレーム撮影時刻とエンコーダ値の取得タイミングは同期が取れておらず、それぞれの取得周期も一致していないため、そのままでは手先位置のずれ量を精度良く求めることができない。

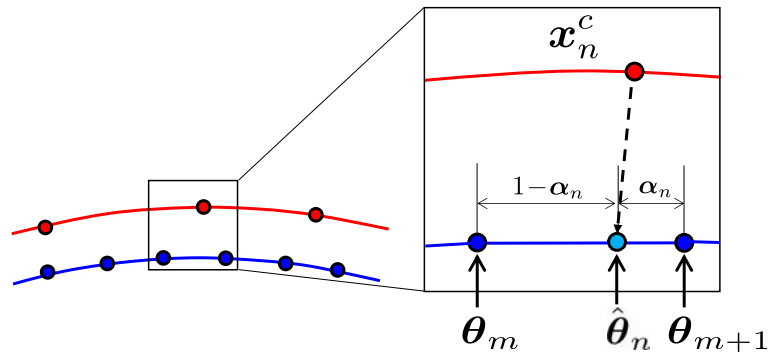


Fig.5.5: Estimation of angles measured by encoders in line with the timing of camera capture.

そこで、図 5.5 のように動画のフレーム番号を n としたとき、動画上の手先位置 x_n^c に対応する $\hat{\theta}_n$ を求める。図 5.5 の青線はエンコーダで計測した角度をもとに計算した手先位置の軌道で、青点はそれぞれ計測タイミングである。赤線はカメラで計測した手先軌道で、赤点が撮影タイミングを示す。拡大図の赤点から青線に向かう矢印はカメラ撮影タイミングに相当するエンコーダ計測タイミングを表している。 x_n^c が撮影されたカメラでの時刻と対応するロボット制御系での時刻がエンコーダ取得タイミング m と $m+1$ の間だったとき、係数 α_n を用いて、

$$\hat{\theta}_n = (1 - \alpha_n)\theta_m + \alpha_n\theta_{m+1} \quad (5.28)$$

のように線形補間した $\hat{\theta}_n$ を x_n^c に対応した関節角度とする。ここで、 $\hat{\theta}_n$ は

$$\hat{\theta}_n = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1^n \\ \hat{\theta}_2^n \\ \hat{\theta}_3^n \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

である。エンコーダで計測した角度から計算した手先位置は式 (2.1) から

$$\hat{x}_n^e = \begin{bmatrix} \ell_1 \cos(\tilde{\theta}_1^n) + \ell_2 \cos(\tilde{\theta}_1^n + \tilde{\theta}_2^n) + \ell_3 \cos(\tilde{\theta}_1^n + \tilde{\theta}_2^n + \tilde{\theta}_3^n) \\ \ell_1 \sin(\tilde{\theta}_1^n) + \ell_2 \sin(\tilde{\theta}_1^n + \tilde{\theta}_2^n) + \ell_3 \sin(\tilde{\theta}_1^n + \tilde{\theta}_2^n + \tilde{\theta}_3^n) \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

と表すことができる。ただし,

$$\tilde{\theta}_1^n = \hat{\theta}_1^n + \Delta\theta_1 \quad (5.31)$$

$$\tilde{\theta}_2^n = \hat{\theta}_2^n + \Delta\theta_2 \quad (5.32)$$

$$\tilde{\theta}_3^n = \hat{\theta}_3^n + \Delta\theta_3 \quad (5.33)$$

とした。また、 $\mathbf{x}^e$ と大きさが一致するように $\mathbf{x}^c$ に線形幾何学変換したものを $\bar{\mathbf{x}}^c$ とする。カメラの設置位置をロボット座標の $\mathbf{xy}$ 平面に投影した点を $\mathbf{x}_o$ とすると,

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_1^c \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{x}}_N^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_1^e \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_N^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{J}_N \end{bmatrix} \Delta\boldsymbol{\theta} + \begin{bmatrix} I_2 \\ \vdots \\ I_2 \end{bmatrix} \mathbf{x}_o \quad (5.34)$$

と表すことができる。式 (5.34) をまとめ

$$\mathbf{x}^c = \hat{\mathbf{x}}^e + \mathbb{J}\Delta\boldsymbol{\theta} + \mathbb{I}\mathbf{x}_o \quad (5.35)$$

と表す。評価関数を

$$J_c = \|\mathbf{x}^c - (\hat{\mathbf{x}}^e + \mathbb{J}\Delta\boldsymbol{\theta} + \mathbb{I}\mathbf{x}_o)\|^2 \quad (5.36)$$

とし、 $\boldsymbol{\alpha}$, $\Delta\boldsymbol{\theta}$, $\mathbf{x}_o$ を設計変数としてガウス・ニュートン法で J_c を最小化し、 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ の推定値 $\hat{\Delta\boldsymbol{\theta}}$ を同定する。なお、 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_M]^T$ とした。 $\alpha_i = 0$, または 1 の場合には、 $\boldsymbol{\theta}_m$ を隣の点に移動させていく。

5.4 実験検証

5.4.1 実験装置の構成

図 5.3, 図 5.4 の軌道を用いて軌道一周を 21.6 秒で実験用ロボットを動作させ、動画から計測した手先位置から関節角度原点誤差を同定する実験を行った。実験装置の構成を図 5.6 に示す。実験に用いたロボットのリンク長は、 $\ell_1 = 335.0 \text{ mm}$, $\ell_2 = 439.5 \text{ mm}$, $\ell_3 = 250.0 \text{ mm}$ であり、ロボットの手先に直径 9 mm の球状再帰性反射マーカを設置し、照明を照射したうえ、デジタルカメラにより動画を撮影した。撮影に用いたカメラの仕様・撮影条件を表 5.1 に示す。これは民生用カメラであり容易に入手可能である。

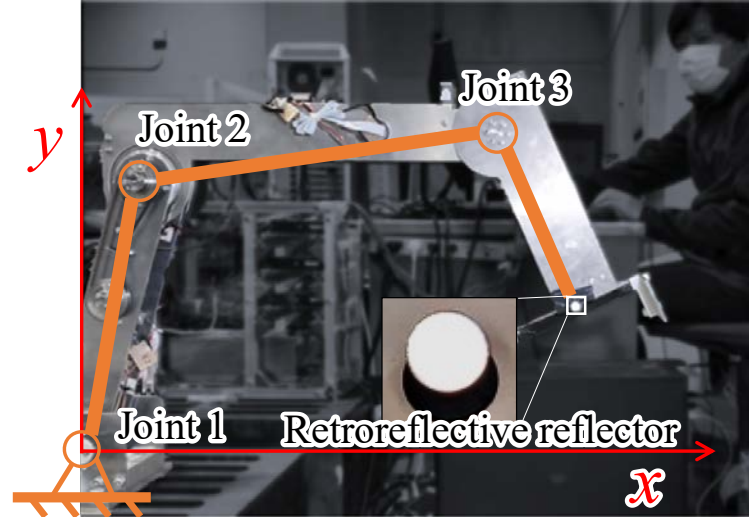


Fig.5.6: Experimental robot and its configuration. A spherical retroreflective marker with a diameter of 9 mm is placed on the robot's tip.

Table 5.1: Camera specifications and video recording conditions.

Frame rate	60 fps
Image resolution	1920 × 1080 pixel
Distance from robot	4.0 m
Optical zoom	5×

5.4.2 実験手法

実験では関節角度のオフセット $\Delta\theta^r$ として表 5.2 の 15 パターンを誤差相当のものとして与えた。計測した手先位置ずれから求めた $\Delta\hat{\theta}$ と $\Delta\theta^r$ を比較し提案手法の精度確認を行った。予め動画とエンコーダから計測した関節角度に基づき、マーカの設置位置のキャリブレーションを実施した。これは実用時にはマーカ設置位置を精密に規定することに相当する。今回は $\mathbf{x}^c$ から $\mathbf{x}^e$ への線形幾何学変換行列は既知であるとして $\Delta\theta^r = [0 \ 0 \ 0]^T$ を与えた計測結果から算出した値を用いた。この実験ではカメラによる位置計測の分解能は 1 pixel あたり 0.2 mm であった。

5.4.3 実験結果と考察

計算した目標軌道でロボットを動作させたときの手先軌道を図 5.7 に示す。黒実線は No.2, 5, 8 を与えた実験でのエンコーダ値から求めた手先位置を表しており、3 回分の計測結果がほぼ一致している。すなわち、各関節はすべて目標値通りに動いており手先ずれはすべて関節角度原点誤差の影響となる。赤点・緑点・青点が表 5.2 に示した No.2, 5, 8 の $\Delta\theta^r$ を与えた場合の軌道（カメラでの計測結果）を表す。破線が目標軌道であり、図 5.3 の楕円に対応している。 $\mathbf{p}_1$ から $\mathbf{p}_3$ への区

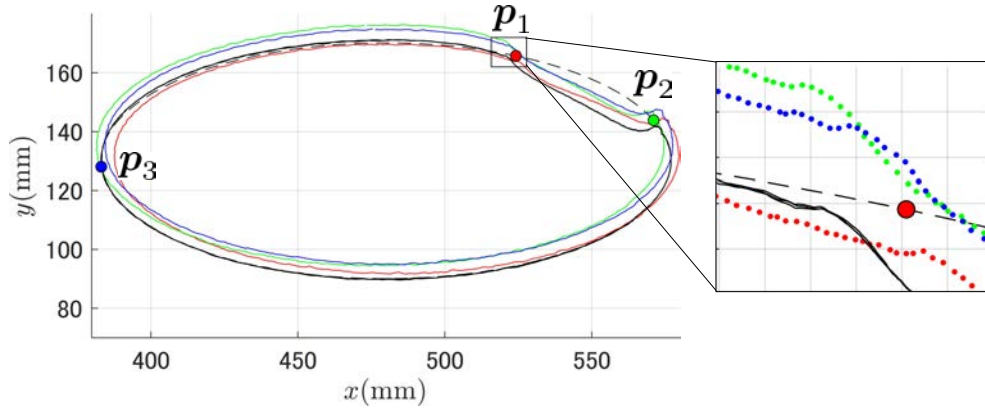


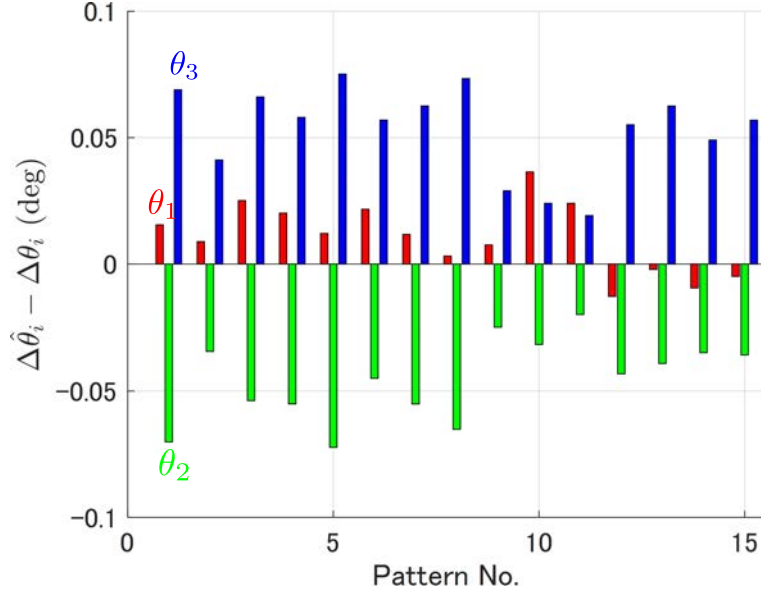
Fig.5.7: Results of the camera measurements, which are converted into robot coordinates.

間で特異点近傍を通過し関節角速度が大きくなったため楕円から変化しているが、カメラ計測値とエンコーダ計測値の相対関係が重要であるため、 $\Delta\hat{\theta}$ の推定には影響しない。 p_1 付近の拡大図をみると各パターンで手先ずれを比較的精度よく計測できると見込まれる軌道の法線方向に変化が表れていることがわかる。

Table 5.2: Offset patterns and identification results of joint angle origin error.

No.	$\Delta\theta_1^r$	$\Delta\theta_2^r$	$\Delta\theta_3^r$	$\Delta\hat{\theta}_1$	$\Delta\hat{\theta}_2$	$\Delta\hat{\theta}_3$ (deg)
1	-0.50	-0.50	-0.50	-0.48	-0.57	-0.43
2	-0.50	+0.50	+0.00	-0.49	+0.47	+0.04
3	+0.50	-0.50	+0.50	+0.53	-0.55	+0.57
4	+0.00	-0.50	+0.00	+0.02	-0.56	+0.06
5	+0.50	+0.00	-0.50	+0.51	-0.07	-0.42
6	+0.00	+0.00	+0.50	+0.02	-0.04	+0.56
7	-0.50	+0.00	+0.00	-0.49	-0.06	+0.06
8	+0.00	+0.50	-0.50	+0.00	+0.43	-0.43
9	-0.50	+0.50	+0.50	-0.49	+0.48	+0.53
10	+0.50	+0.50	+0.00	+0.54	+0.47	+0.02
11	+0.50	+0.50	+0.50	+0.52	+0.48	+0.52
12	-0.10	-0.10	-0.10	-0.11	-0.14	-0.04
13	+0.10	+0.10	+0.10	+0.10	+0.06	+0.16
14	+0.10	-0.10	+0.10	+0.09	-0.13	+0.15
15	-0.10	+0.10	+0.10	-0.10	+0.06	+0.16
Root Mean Square Error $\sigma_{\theta_i m}$				0.02	0.05	0.06

同定結果を表 5.2 と図 5.8 に示す。 $\Delta\hat{\theta}_1$, $\Delta\hat{\theta}_2$, $\Delta\hat{\theta}_3$ の二乗平均平方根誤差 (RMSE Root Mean

Fig.5.8: Identification errors of $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ and $\Delta\theta_3$.

Squared Error) は

$$\sigma_{\theta_{im}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\Delta\hat{\theta}_i - \Delta\theta_i^r\|^2} \quad (5.37)$$

とした．図 5.8 は $\Delta\hat{\theta}_1$, $\Delta\hat{\theta}_2$, $\Delta\hat{\theta}_3$ と $\Delta\theta_1^r$, $\Delta\theta_2^r$, $\Delta\theta_3^r$ との差を表したものである．特に大きな外れ値もなく誤差は ± 0.07 度の範囲に収まった． $\Delta\hat{\theta}_2$ と $\Delta\theta_2^r$ の差はマイナス方向， $\Delta\hat{\theta}_3$ と $\Delta\theta_3^r$ との差はプラス方向に発生する傾向があった．計測結果に減速機やリンクのたわみなどが含まれているため，この傾向が発生している可能性があると思われるが，これらはモデルとして考慮していないため，理由の断定はできない．また，今回の実験における推定値の真値とのずれの RMSE $\sigma_{\theta_{1m}}$, $\sigma_{\theta_{2m}}$, $\sigma_{\theta_{3m}}$ は，それぞれ，0.02 度，0.05 度，0.06 度であり，精度良く計測できていることがわかる．これにより，民生用カメラを用いても十分な精度で $\Delta\hat{\theta}$ が同定できることがわかる．

今回の実験ではカメラ座標からロボット座標への線形幾何学変換は既知であるとして扱ったが，実用時には未知の関節角度原点誤差が含まれた手先軌道計測結果から変換を行う必要があり，手先誤差への影響が少ない軌道を用いて変換量を推定するなどの方策が必要であると考える．



5.4.4 3次元6リンクマニピュレータへの拡張の検討

提案手法を3次元6リンクマニピュレータに拡張する場合、拡張された関節角度原点誤差 $\Delta\theta_1 \sim \Delta\theta_6$ とカメラによって計測される手先位置 $\hat{\mathbf{x}}_n^c$ と、手先目標位置 $\hat{\mathbf{x}}_n^r$ の関係は、

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_1^c - \hat{\mathbf{x}}_1^r \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}_N^c - \hat{\mathbf{x}}_N^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{J}}_1 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{J}}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \vdots \\ \Delta\theta_6 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

となり、これをまとめて

$$\Delta\hat{\mathbf{X}} = \hat{\mathbb{J}}\Delta\hat{\boldsymbol{\theta}} \quad (5.39)$$

と書ける。ここで、 $\hat{\mathbf{J}}_n \in R^{2 \times 6}$ であり、 N は計測した点数である。 $\hat{\mathbb{J}}$ の階数が6であれば、式(5.39)を満たす $\Delta\hat{\boldsymbol{\theta}}$ は一意に決定される。そこで、以下の図5.9のように手先位置の3次元での計測を行い、 $\hat{\mathbb{J}}$ の階数が6を満たすように拡張を行えば、提案手法を3次元6リンクマニピュレータへも適用可能であると考えられる。

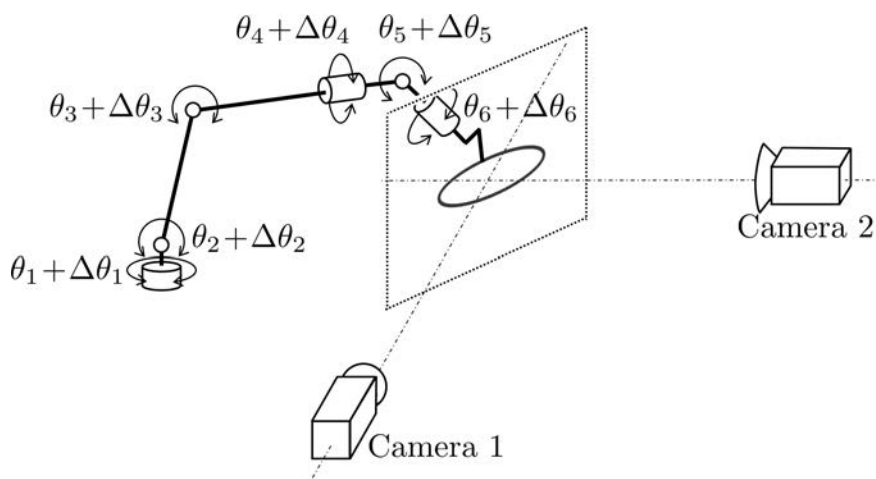


Fig.5.9: Arrangement of equipment and measurement trajectories when extending to a 3D 6-link manipulator.

- 1) 手先位置を3次元に計測できるよう、カメラを2台使い、カメラが同一直線上に整列しないように配置する。
- 2) 目標の楕円軌道は両方のカメラから計測できるよう、斜めに配置する。
- 3) 楕円軌道を用いてそれぞれカメラの外部パラメータをキャリブレーションする。
- 4) カメラからみた $\Delta\theta_1 \sim \Delta\theta_6$ の手先法線方向感度が大きくなる点を最低6点配置する。
- 5) ロボット制御系とカメラの時刻ずれ補正はカメラごとに行い、データをあわせて $\Delta\theta_1 \sim \Delta\theta_6$ を算出する。

5.5 おわりに

本章では，感度を利用することで，動作改善に必要な関節角度原点誤差を簡易なカメラで同定する方法を提案した．その中で，関節角度原点誤差の手先位置ずれに対する感度を利用し，角度原点誤差が精度よく計測できるよう誤差が拡大する軌道を求め，実験によりその有効性を確認した．



第 6 章

結論

本論文では、アーク溶接ロボットにおけるウィービング運動に代表される直列ロボットの周期運動におけるクーロン摩擦や動力学パラメータなどの手先ずれに対する感度を考慮することにより、動作改善を行う方法を提案した。また、直列ロボットの動作改善に必要な関節原点誤差を生産現場で簡易に計測する方法にも感度を用いることが有用であることを示した。

3 章では、周期的運動中の手先誤差を低減するなめらかなフィードフォワード入力を、感度を用いた誤差解析から導出し、実験によりその有効性を確認した。主な成果は以下である。

1. 平面 3 リンクマニピュレータを対象とし、タスクに固有な誤差を重視する方向性の例として溶接のウィービング動作に要求される上下方向誤差と振幅誤差を考え、その低減を行うなめらかなフィードフォワード入力算出方法を提案した。
2. クーロン摩擦を連続値とみなして繰り返し計算することにより、クーロン摩擦係数が大きい場合であっても摩擦低減に有効なフィードフォワード入力を導出した。
3. 実験用ロボットにて上記なめらかなフィードフォワード入力により、矩形のフィードフォワードトルクを用いた場合と比較し、上下方向誤差は同等、振幅誤差は低減されることを確認し、その有効性を示した。

周期的運動を指定し、運動の感度を考慮することによって、クーロン摩擦においては運動性能の改善を行うことができた。しかし、周波数 2Hz の結果では、クーロン摩擦力以外の影響が大きく、誤差の発生形態が変化していた。そこで 4 章では本章で提案した周期運動における手先誤差に対する感度を考慮するという考え方を拡張し、上下方向のばらつきを低減する動力学パラメータを確率的に同定する手法について取り組んだ。4 章の目的は、周期運動を対象として最小動力学パラメータの動的感度解析に基づいてロボットの周期的な運動に適したパラメータの同定を行い、得られたパラメータのフィードフォワードトルクによる制御によって周期運動の特定方向の精度が向上できることである。主な成果は以下である。

1. 動的/静的運動の感度とフィードフォワード制御の感度を考慮することにより確率的同定の繰り返し計算を安定化する手法を提案した。

2. 提案手法に基づきパラメータを同定し、最小二乗法などによる同定値と比較を行うことで、提案手法のパラメータがロボットの周期運動に特化した特徴的なパラメータであることを確認した。
3. 最小二乗法と提案手法の比較を実験ロボットを用いて行い、周期運動時の手先の鉛直方向の誤差を低減できることを確認した。また、副次的であるがそのフィードフォワードトルクが水平方向の誤差も低減することを確認した。

上記より、運動における動的感度を用いた動作改善を実施した結果、上記の効果を得ることができた。このことからロボットの動作改善に感度を考慮することは有効であるといえる。

5章では、関節原点誤差による手先位置ずれの感度を利用し、原点誤差が精度よく計測できるような誤差が拡大する軌道を求め、実験によりその有効性を確認した。主な成果は以下である。

1. 関節角度原点誤差によって手先誤差の軌道の法線方向にずれが大きく、他の軸の関節角度原点誤差の影響が小さい点を最適計算によって求めた。
2. 上記の点を楕円上に配置することにより、動画で簡易に一回の計測で短時間に計測可能で、ロボットが動作可能な軌道を生成する手法を提案した。
3. ロボット制御系とカメラの時刻ずれとカメラ画像内での撮影位置のずれを考慮した関節原点誤差の推定方法を提案した。
4. 実験用ロボットにて上記軌道を目標として動作させ、実験的に与えた原点オフセットを比較的精度良く計測できることから、その有効性を示した。

提案した手法をアーク溶接ロボットへ応用することで、3章のクーロン摩擦補償においては、同一型式に対して調整されているクーロン摩擦補償不感帯などの調整を不要にできる可能性があり、コスト低減が見込まれること、また、外気温変化、経年変化などによる摩擦係数の変換による振動の発生が抑えられることになり、製造現場での溶接品質の安定化につながるなどが効果として考えられる。また、4章の周期運動に適したパラメータ同定方法では、アーク溶接ロボットで用いられているフィードフォワードモデルに対して最小二乗法などで同定されたパラメータよりウィービング中の上下振動が低減されるパラメータが得られることから、アークセンサの追従ゲインを大きくし、追従性を向上させることにつながる可能性がある。アークセンサの追従性を向上させることができれば、溶接接合部の熱歪みや、曲線部溶接におけるワーク製作誤差への尤度が上昇するため、製造現場でのコスト低減に寄与できる。また、5章の関節原点誤差の同定では、研究目的のべたロボット交換時の復旧迅速化に加え、別ラインの機体差低減に応用することで、同一形状の複数ラインでのタスクプログラム流用性の向上につながることから、製造現場での教示作業の大幅な低減に貢献できる。

今後の課題としては、3章、4章で提案した運動の動的感度を用いる方法では、フィードフォワードトルク算出での動作改善を行っているため、想定外の外乱に対する改善は限定的であると考えられる点がある。この点については、運動に対する動的感度を用いる方法を制御系設計にも拡張する



ことなどが考えられる。また、実用化にあたっては、6 軸マニピュレータに拡張するにあたり、運動方程式の複雑化にともなう定式化の複雑化および計算量の増加が考えられる。定式化が複雑になる課題については、数式処理ソフトウェアなどの活用が考えられる。特に感度の算出に必要な微分計算については、機械学習分野で利用されている自動微分が利用できるを考える。5 章提案内容については、本文内で 6 軸マニピュレータへの対応についてその可能性について述べた。実用化への課題としては、実際の生産現場での実証実験が必要なことや、マニピュレータの移動装置や溶接対象物を位置決めするポジショナなどの周辺装置を含めた検討が必要なが挙げられる。移動装置はマニピュレータを平行移動させる付加軸となるため、さらなる計算量の増加などの懸念があるが、移動装置・ポジショナともに単体でみた場合、そのリンク構造はマニピュレータと比較して単純であり、分離して対応が可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 内閣府, 令和 4 年版高齢社会白書,(2022)
- [2] 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省, 2022 年版ものづくり白書 (ものづくり基盤技術振興基本法第 8 条に基づく年次報告), (2022)
- [3] 総務省, 国政調査, 国勢調査/時系列データ/人口の労働力状態, 就業者の産業・職業, (2017), https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?stat_infid=000001086332, 2022 年 12 月 18 日参照
- [4] 総務省, 国政調査, 国勢調査/令和 2 年国勢調査/抽出詳細集計 (主な内容: 就業者の産業・職業 (小・中分類) など), (2020), https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?stat_infid=000032266822, 2023 年 2 月 23 日参照
- [5] OECD, Average annual wages, (2022), https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AV_AN_WAGE, 2023 年 2 月 23 日参照
- [6] 経済産業省, 未来人材ビジョン, (2023), <https://www.meti.go.jp/press/2022/05/20220531001/20220531001-1.pdf>, 2023 年 2 月 23 日参照
- [7] (株) 神戸製鋼所, WELDING ROBOT ARCMAN 溶接システム総合カタログ, (2012),
- [8] 笠上文男, 石松隆和, 藤田雅成, 協調動作を行うティーチング・プレイバックロボットの制御方式, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.1(1993), pp. 165–170.
- [9] 日本規格協会, JISB0134:2015 ロボット及びロボティックデバイス - 用語, (2015)
- [10] 阪上宏, 産業用ロボットの現状と今後の知能化, 空気調和・衛生工学会大会近畿支部発表会論文集, Vol.1986(1987), pp. 1–13.
- [11] 西泰彦, ウィービング溶接, 溶接学会誌, Vol.67, No.4 (1998), pp. 321–325.
- [12] 杉谷祐司, アークセンサの使い方, 溶接学会誌, Vol.69, No.2(2000), pp. 140–144
- [13] 重吉正之, 西村利彦, R&D 神戸製鋼技報, Vol.59, No.2(2009), pp.12–16
- [14] Liu, W., Li, L., Hong, Y. and Yue, J., Linear mathematical model for seam tracking with an arc sensor in P-GMAW processes, Sensors, Vol.17 (2017), pp. 591
- [15] 西田吉晴, 井上芳英, 中厚板向けアーク溶接ロボットの動作制御, 計測と制御, Vol.51, No.9 (2012), pp.874–879.
- [16] 井上芳英, 西田吉晴, 溶接ロボットのウィービング動作制御 (特集: 溶接・接合技術), R&D



- 神戸製鋼技報, Vol.54, No.2(2004), pp.91–95.
- [17] 西田吉晴, 井上芳英, 中厚板向けアーク溶接ロボットの動作制御, 計測と制御, Vol.51, No.9(2012), pp.874–879.
- [18] 榎本敦子, 杉本浩一, 松本義雄, マクロ・マイクロ機構のインピーダンス制御: 作業モデルに基づくモデルベース制御の統一的手法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.646(2000), pp. 1849–1856.
- [19] 吉川恒夫, 金岡克弥, 柔軟マクロ/剛体マイクロマニピュレータの振動抑制を考慮した準静的軌道制御, 日本ロボット学会誌, 2001, Vol.19, No.1(2001), pp. 109–115.
- [20] 永谷達也, 野田哲男, 田中健一, 座標系校正による産業用ロボットの位置復旧支援技術, 計測自動制御学会論文集, Vol.50, No.1(2014), pp. 30–36.
- [21] 前川仁, 牧野吉延, 気賀智也, 飯島亨, 仲田周次, 教示-再生型アーク溶接ロボットを用いた計算機援用溶接システムとそのオフライン作業教示法, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.3(1988), pp. 193–204.
- [22] 水川真, 小山俊彦, 産業用ロボットの教示方法の現状と展望, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.2(1999), pp. 180–185.
- [23] 石川均, 野瀬松男, 鮫島泰郎, ロボットコントローラの運動制御技術, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.6(1996), pp. 776–779.
- [24] 高野政晴, ロボットの運動の高速化技術, 計測と制御, Vol.21, No.12(1982), pp. 1122–1128.
- [25] 呉屋秀将, 松阪憲人, 植村充典, 西岡靖貴, 川村貞夫, 1P1-F03 可変剛性省エネルギー制御法のピック&プレイス作業への適用 (作業をするロボット), ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2012, セッション ID 1P1-F03(2012), pp. 1P1-F03_1–1P1-F03_2.
- [26] 川路茂保, 小笠原健一, 飯盛淳二, コンプライアンスを用いた二足歩行ロボットの運動制御, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol.116, No.1(1996), pp. 11–18.
- [27] 梅枝真守, 梶原秀一, 田中孝之, 金子俊一, 周期入力制御を用いた準受動的歩行ロボットの斜度・外乱に対するロバスト性, 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.8(2006), pp. 974–981.
- [28] De Wit, C. C., Olsson, H., Astrom, K. J. and Lischinsky, P., A new model for control of systems with friction, IEEE Transactions on automatic control, Vol.40, No.3 (1995), pp.419–425.
- [29] 金森佳紀, 藤本真作, 小野敏郎, 動的摩擦補償モデルを用いたマニピュレータの制御, 中国四国支部総会・講演会 日本機械学会講演論文集, Vol.42 (2004), pp. 377–378.
- [30] 岩谷正義, 菊植亮, 山本元司, 並列粘弾性摩擦モデルに基づく波動歯車減速機の摩擦補償, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.5 (2014), pp. 445–455.
- [31] Maeda, Y. and Iwasaki, M., Feedforward friction compensation using the rolling friction model for micrometer-stroke point-to-point positioning motion, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.7, No.2 (2018), pp.141–149.
- [32] 坂上憲光, 川村貞夫, 時間軸変換を利用した水中ロボットマニピュレータのフィードフォワー

- ド入力生成, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.5 (2003), pp. 562–568.
- [33] Guo, K., Pan, Y. and Yu, H., Composite learning robot control with friction compensation: a neural network-based approach, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.66, No.10 (2019), pp.7841–7851.
- [34] 渡部哲諸, 清水友治, 石原正, 猪岡光, カルマンフィルタを用いて摩擦を補償するサーボ系の構成, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.56, No.521 (1990), pp. 62–66.
- [35] 岩崎誠, 柴田知宏, 松井信行, 外乱オブザーバによる非線形摩擦補償とテーブル駆動系への適用, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.118, No.1 (1998), pp. 51–57.
- [36] 中塚大輝, 岡田昌史, 感度解析による微細作業のノイズ低減化運動, 第 38 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集 DVD-ROM, RSJ2020ACD1-05 (2020).
- [37] Atkeson, C.-H., An, C.-H. and Hollerbach, J.-M., Estimation of Inertial Parameters of Manipulator Loads and Links, The International Journal of Robotics Research, Vol.5, No.3 (1986), pp.101–119.
- [38] 川崎晴久, 西村国俊, マニピュレータのパラメータ同定, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, No.1 (1986), pp.76–83.
- [39] 吉田浩治, 池田展也, 前田浩一, 6 自由度産業用マニピュレータに対するパラメータ同定法の実証的検証, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4 (1993), pp.564–573.
- [40] Gautier, M. and Khalil W., Exciting trajectories for the identification of base inertial parameters of robots, Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control, Vol.1 (1991), pp.494–499.
- [41] Ayusawa, K., Rioux, A., Yoshida, E., Venture, G. and Gautier, M., Generating persistently exciting trajectory based on condition number optimization, 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2017), pp.6518–6524.
- [42] 大谷幸司, 柿崎隆夫, 中川三男, 多関節マニピュレータの動力学パラメータ同定に関する実験的検討, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7, pp.1083–1092, 1993.
- [43] 櫛弘明, 川村貞夫, パラメータ推定誤差存在下でのロボットの位置と力のフィードバック軌道追従制御解析, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.6 (2012), pp.303–310.
- [44] Khalil, W. and Besnard, S., Geometric calibration of robots with flexible joints and links, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.34, No.4(2002), pp. 357–379.
- [45] Meggiolaro, M. A., Dubowsky, S., Mavroidis, C., Geometric and elastic error calibration of a high accuracy patient positioning system, Mechanism and Machine Theory, Vol.40, No.4(2005), pp. 415–427.
- [46] 茨木創一, 宜川武史, 松原厚, 垣野義昭, 中川昌夫, 松下哲也, 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 3 報), 精密工学会誌論文集, Vol.72, No.3(2006), pp. 355–359.
- [47] 大明準治, 足立修一, シリアル 2 リンク 2 慣性系の非干渉化同定と物理パラメータ推定, 電気学



- 会論文誌D（産業応用部門誌），Vol.128, No.5(2008), pp. 669–677.
- [48] 小坂裕紀, 島田明, モータと減速機を考慮したロボットマニピュレータ制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.5(2005), pp. 466–472.
- [49] 足立修一, システム同定の基礎, (2009), 東京電機大学出版局
- [50] Zhou, T. and Kimura H., Simultaneous identification of nominal model, parametric uncertainty and unstructured uncertainty for robust control, Automatica, Vol.30, No.3 (1994), pp.391–402.
- [51] 中村尚範, ロボットの機械誤差キャリブレーション技術と生産ラインにおける現状, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2(1997), pp. 178–182.
- [52] 藤岡潤, 青柳誠司, 石井一久, 関啓明, 神谷好承, レーザトラッキングシステムを用いたロボットのキャリブレーションに関する研究 (第2報), 精密工学会誌, Vol.67, No.4(2001), pp. 676–682.
- [53] Ma, L., Bristow, D. A., Landers and R. G., Modeling and Compensation of Industrial Robot Kinematic Errors using a SMARTTRACK Sensor, Proceedings of the International Symposium on Flexible Automation, 2018 International Symposium on Flexible Automation, Vol.2018(2018), pp. 209–216.
- [54] 古屋信幸, ステレオカメラによる水平多関節形ロボットの位置決め精度の補正, 精密工学会誌, Vol.67, No.10(2001), pp. 1647–1657.
- [55] Švaco, M., Šekoranja, B., Šuligoj, F. and Jerbić, B., Calibration of an Industrial Robot Using a Stereo Vision System, Procedia Engineering, Vol.69(2014), pp. 459–463.
- [56] Ibaraki, S., Theissen, N. A., Archenti A., Alam, M., Evaluation of Kinematic and Compliance Calibration of Serial Articulated Industrial Manipulators, Int. J. Automation Technol., Vol.15, No.5(2021), pp. 567–580.
- [57] Wang, D., Wang, J., Zhu, X. and Shao, Y., Determination of optimal measurement configurations for polishing robot calibration, International Journal of Modelling, Identification and Control, Vol.21, No.2(2014), pp. 211–222.
- [58] 井本淳一, 武田行生, 斎藤秀伸, 一柳健, 最大位置決め誤差推定に基づくロボットの最適機構キャリブレーション, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.747, No.48(2008), pp.3069–3076.
- [59] Ohno, M., Takeda, Y., Design of target trajectories for the detection of joint clearances in parallel robot based on the actuation torque measurement, Mechanism and Machine Theory, Vol.155(2021), pp.104081.
- [60] 石井優, 最近のロボットキャリブレーション技術, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2(1997), pp. 164–168.
- [61] Judd, R. P. and Knasinski, A. B., A Technique to Calibrate Industrial Robots with Experimental Verification, Proceedings of IEEE Robotics and Automation Conference, Vol.6, No.1(1990), pp.20–30.

- [62] A. Kohatsu-Higa, 安田和弘, 金融工学における Malliavin 解析を用いた感度計算, オペレーションズ・リサーチ = Communications of the Operations Research Society of Japan : 経営の科学, Vol.55, No.10(2010), pp.643–649.
- [63] 香田正人, 本間俊充, 感度解析について, オペレーションズ・リサーチ = Communications of the Operations Research Society of Japan : 経営の科学, Vol.55, No.10(2010), pp.613–621.
- [64] 香田正人, ポスト・ノーマルサイエンスとグローバル感度解析, 横幹, Vol.5, No.1(2011), pp. 37–40.
- [65] 竹内文乃, 野間久史, 観察研究におけるバイアスの感度解析, 統計数理 = Proceedings of the Institute of Statistical Mathematics, Vol.62, No.1(2014), pp. 77–92.
- [66] 田栗正隆, 直接効果・間接効果の推定および未測定の変動に対する感度解析, 統計数理 = Proceedings of the Institute of Statistical Mathematics, Vol.62, No.1(2014), pp. 59–75.
- [67] 井上健司, 高野政晴, 佐々木健, 感度を利用した動力学に基づくロボット構造の最適設計システム, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.1(1991), pp. 18–28.
- [68] 菊田征勇, 松井邦人, 高田清美, 水野篤志, 川島寿彦, 構造物の動的感度解析, 国土舘大学情報科学センター紀要, Vol.11(1990), pp.23–60.
- [69] 久田俊明, 野口裕久, 村山修, 配管系における動的弾塑性応答感度解析コードの開発, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.57, No.541(1991), pp. 2091–2098.
- [70] Park, Tong-Jin, Han, Chang-Soo, Jang, Jin-Hee, Dynamic sensitivity analysis for the pantograph of a high-speed rail vehicle, Journal of Sound and Vibration, Vol.266, No.2(2003), pp. 235–260.
- [71] Liang-kang, Goo, Qi-xian, Zhang, The sensitivity analysis of dynamic parameters in robot dynamics, Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, (1998), pp. 94–97.
- [72] Okada, M. and Sekiguchi, T., Throwing motion design based on minimum sensitivity with respect to error covariance of robot dynamic parameters, Mechanical Engineering Journal, Vol.8, Issue 1 (2021).
- [73] 武田行生, 沈崗, 舟橋宏明, フーリエ級数を用いたパラレルメカニズムのキャリブレーション : 第 1 報, キャリブレーション法および測定運動の選定法の提案 (機械要素, 潤滑, 工作, 生産管理など), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68 巻, No.673(2002), pp. 2762–2769.
- [74] 沈崗, 武田行生, 舟橋宏明, フーリエ級数を用いたパラレルメカニズムのキャリブレーション : 第 2 報, 実験的検討 (機械要素, 潤滑, 工作, 生産管理など), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.69, No.682(2003), pp. 1691–1698.
- [75] 星空つづり, 比較明合成フリーソフト SiriusComp, リリース番号 20180116a (2018), <https://phaku.net/siriuscomp/>, 2023 年 02 月 17 日参照.



研究発表

発表論文

- [1] 岡田昌史, 小池武, 感度を利用した誤差解析に基づく周期運動の外乱抑制制御系の設計, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.913(2022), p. 22-00088.
- [2] 岡田昌史, 森山創月, 小池武, フィードフォワード制御のための動的/静的感度解析による周期運動制御に適したパラメータの確率的同定, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.911(2022), p. 22-00087.
- [3] 小池武, 岡田昌史, 感度解析に基づくロボット関節誤差拡大軌道の設計と動画による関節原点誤差計測, 日本機械学会論文集, Vol.89, No.919(2023), pp. 22-00310.

口頭発表

- [1] ○小池武, 岡田昌史, 感度を用いた誤差解析に基づく周期運動の外乱抑制, 第 39 回日本ロボット学会学術講演会, 1E3-06(2022).
- [2] 森山創月, ○小池武, 岡田昌史, パラメータの誤差共分散同定と感度解析を利用したロボットの周期運動制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021, 1A1-E01(2021).
- [3] ○森山創月, 小池武, 岡田昌史, 動的/静的感度に基づくパラメータの誤差共分散同定とロボットの周期運動制御, 第 39 回 日本ロボット学会学術講演会, AC3B1-02(2021).
- [4] 森山創月, ○小池武, 岡田昌史, 動的/静的運動・フィードフォワード制御の感度に基づくパラメータの誤差共分散同定, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2A2-L12(2022).
- [5] ○小池武, 岡田昌史, 感度解析に基づくロボット関節誤差拡大軌道の設計と簡易動画による関節原点誤差計測, 第 23 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1P3-A08(2022).

謝辞

本研究を進めるうえで、終始精力的なご指導と多くのご助言・ご提案をいただいた東京工業大学工学院 岡田昌史教授に謹んで深甚なる感謝の意を表します。

土方亘准教授には、研究会でのご指摘・ご質問をいただき、より俯瞰的に見て研究を進めていくことができた。ここに感謝の意を表します。

この研究において、貴重なご指導と深い示唆をいただいた東京工業大学工学院 武田行生教授に、心より感謝申し上げます。先生からいただいた建設的なご意見により、本論文を大きく改善することができました。また、本論文をまとめるにあたり、有益なご教示とご討論を賜りました東京工業大学工学院 岩附信行教授、東京工業大学工学院 山浦弘教授に深く御礼申し上げます。

本研究の実験検証で利用した実験用ロボットの制作・立ち上げおよび第3章の理論的な基礎部分の研究遂行においてご尽力いただいた東京工業大学工学院岡田土方研究室の中塚大輝さんに感謝いたします。第4章における研究の遂行に尽力いただいた東京工業大学工学院岡田土方研究室の森山創月さんに感謝いたします。また、研究の遂行にあたって有益な議論をいただいた東京工業大学工学院岡田土方研究室 渡邊和喜さんに感謝の意を表わします。株式会社神戸製鋼所技術センター溶接システム部 湊達治課長には第5章の研究を始めるにあたって発端となった製造現場における課題についてご教授いただきました。ここに感謝の意を表します。

この研究は、神戸製鋼所によって支援いただきました。ここに感謝の意を表します。

株式会社神戸製鋼所溶接事業部門技術センター 清水弘之担当役員補佐、株式会社神戸製鋼所溶接事業部門技術センター溶接システム部 松村浩史には、本研究の機会を頂き、博士課程での研究遂行に対する種々のご助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。

株式会社神戸製鋼所溶接事業部門技術センター 井上芳英センター長、同センター溶接システム部 重吉正之担当部長には、研究の遂行を見守っていただき、様々な相談に暖かく応えて頂いたことを感謝いたします。

最後に、私の妻であり、私をいつも支えてくれるパートナーである富紀に感謝の意を表します。富紀は私が博士課程進学に迷っていたとき、ぜひチャレンジすべきだと背中を押してくれました。また、博士課程を進める上で不可欠な理解と協力を示してくれました。また、研究を進める上では、子供たちの我慢も不可欠でした。長男 陸幹、次男 悠司朗に感謝を表します。



付録 A

摩擦係数の同定

クーロン摩擦係数と動摩擦係数の同定は関節を等速運動を行った結果を用いて行った．式 (2.36) ～式 (2.38) において， $\ddot{\Theta} = 0$ としたとき，運動方程式は，

$$\begin{aligned}
 & -m_2\ell_{g2}\sin\alpha_2\cos(\Theta_2-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_2^2 - (m_2\ell_{g2}\cos\alpha_2 + m_3\ell_2)\sin(\Theta_2-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_2^2 \\
 & -m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\cos(\Theta_3-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_3^2 - m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\sin(\Theta_3-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_3^2 \\
 & -m_1\ell_{g1}\sin\alpha_1g\sin\Theta_1 + (m_1\ell_{g1}\cos\alpha_1 + m_2\ell_1 + m_3\ell_1)g\cos\Theta_1 \\
 & = \tau_1 - \tau_2 - d_1\dot{\Theta}_1 + d_2(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) - \mu_1\text{sgn}(\dot{\Theta}_1) + \mu_2\text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1)
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

$$\begin{aligned}
 & -m_2\ell_{g2}\sin\alpha_2\cos(\Theta_2-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_2^2 - (m_2\ell_{g2}\cos\alpha_2 + m_3\ell_2)\sin(\Theta_2-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_2^2 \\
 & -m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\cos(\Theta_3-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_3^2 - m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\sin(\Theta_3-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_3^2 \\
 & -m_1\ell_{g1}\sin\alpha_1g\sin\Theta_1 + (m_1\ell_{g1}\cos\alpha_1 + m_2\ell_1 + m_3\ell_1)g\cos\Theta_1 \\
 & = \tau_1 - \tau_2 - d_1\dot{\Theta}_1 + d_2(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) - \mu_1\text{sgn}(\dot{\Theta}_1) + \mu_2\text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1)
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

$$\begin{aligned}
 & +m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\cos(\Theta_3-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_1^2 + m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\sin(\Theta_3-\Theta_1)\ell_1\dot{\Theta}_1^2 \\
 & +m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3\cos(\Theta_3-\Theta_2)\ell_2\dot{\Theta}_2^2 + m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3\sin(\Theta_3-\Theta_2)\ell_2\dot{\Theta}_2^2 \\
 & -m_3\ell_{g3}\sin\alpha_3g\sin\Theta_3 + m_3\ell_{g3}\cos\alpha_3g\cos\Theta_3 \\
 & = \tau_3 - d_3(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) - \mu_3\text{sgn}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2)
 \end{aligned} \tag{A.3}$$

となる．等速で正転させた場合の式から等速で逆転させた場合の式を引くことで，式 (A.1)～式 (A.3) は，正転時のトルクを $\tau_1^p \sim \tau_3^p$ ，逆転時のトルクを $\tau_1^m \sim \tau_3^m$ とすると，

$$0 = \tau_1^p - \tau_1^m - (\tau_2^p - \tau_2^m) - 2d_1\dot{\Theta}_1 + 2d_2(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) - 2\mu_1\text{sgn}(\dot{\Theta}_1) + 2\mu_2\text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) \tag{A.4}$$

$$0 = \tau_2^p - \tau_2^m - (\tau_3^p - \tau_3^m) - 2d_2(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) + 2d_3(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) - 2\mu_2\text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) + 2\mu_3\text{sgn}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) \tag{A.5}$$

$$0 = \tau_3^p - \tau_3^m - 2d_3(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) - 2\mu_3\text{sgn}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) \tag{A.6}$$

となり，複数のデータをまとめて書くと

$$\mathbb{P} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{bmatrix} = \mathbb{T} \quad (\text{A.7})$$

となり，

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{bmatrix} = \mathbb{P}^\# \mathbb{T} \quad (\text{A.8})$$

と各摩擦係数を求めることができる．ここで， $\mathbb{P}$ と $\mathbb{T}$ は，時刻 k の正転時のトルクを $\tau_{1,k}^p \sim \tau_{3,k}^p$ ，逆転時のトルクを $\tau_{1,k}^m \sim \tau_{3,k}^m$ とすると，

$$\mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} \dot{\Theta}_1 & \dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_2 & 0 & \text{sgn}(\dot{\Theta}_1) & \text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) & 0 \\ 0 & \dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1 & (\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) & 0 & \text{sgn}(\dot{\Theta}_2 - \dot{\Theta}_1) & \text{sgn}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) \\ 0 & 0 & \dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2 & 0 & 0 & \text{sgn}(\dot{\Theta}_3 - \dot{\Theta}_2) \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$\mathbb{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_N \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$\mathbf{T}_k = \begin{bmatrix} \tau_{1,k}^p - \tau_{1,N-k+1}^m - (\tau_{2,k}^p - \tau_{2,N-k+1}^m) \\ \tau_{2,k}^p - \tau_{2,N-k+1}^m - (\tau_{3,k}^p - \tau_{3,N-k+1}^m) \\ \tau_{3,k}^p - \tau_{3,N-k+1}^m \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$\mathbb{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{T}_N \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

である．なお，式 (A.4)～式 (A.6) の正転動作時と逆転動作時の角度は同じ角度の計測結果を用いる必要があるため，逆転時のトルクを並び替えている．パラメータ同定には，図 A.1 を目標として与えた．速度を 8 段階に変化させており速度毎にデータ数が一定となるよう，動作時間を一定にしている．動作中の等速となる部分での計測された各関節トルクを式 A.8 の計算に用いた．結果は表 3.2 に記載のとおりである．



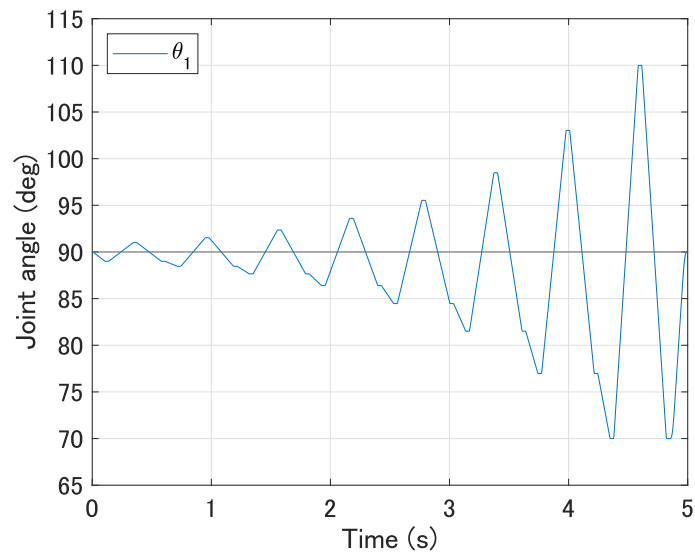


Fig.A.1: Target trajectory for friction coefficient identification