

4. ロボットの制御

1610004 青木 良太

2018 年 6 月 21 日

1 実験の目的

ロボットを用いて各種制御実験を行い, ロボットの各種制御法, 運動学, 動力学, 冗長性について理解する.

2 実験課題

2 リンクのロボットアームを対象として, 制御方法の種類, 目標値の種類, ゲインの大小, モデル誤差の有無を変更し, シミュレーションを行った. 制御方法は PD 制御, 重力補償つき PD 制御, フィードバック線形化の 3 つから選択した. 目標値は時不変目標値 (PTP 制御) と時変目標値 (軌道追従制御) の 2 つから選択した. ゲインの設定は大, 中, 小の 3 つから選択でき, モデル誤差は有, 無の 2 つから選択した.

2.1 課題 1

目標値が時不変, モデル誤差無しの場合について, 各種制御を実行した. その結果を以下に示す.

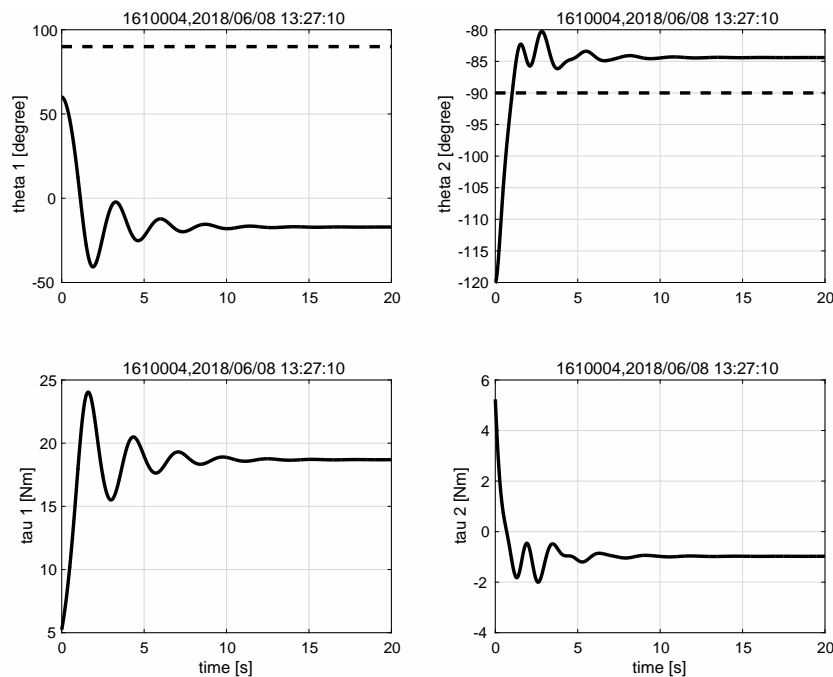


図 1 制御法:PD 制御, ゲイン:小

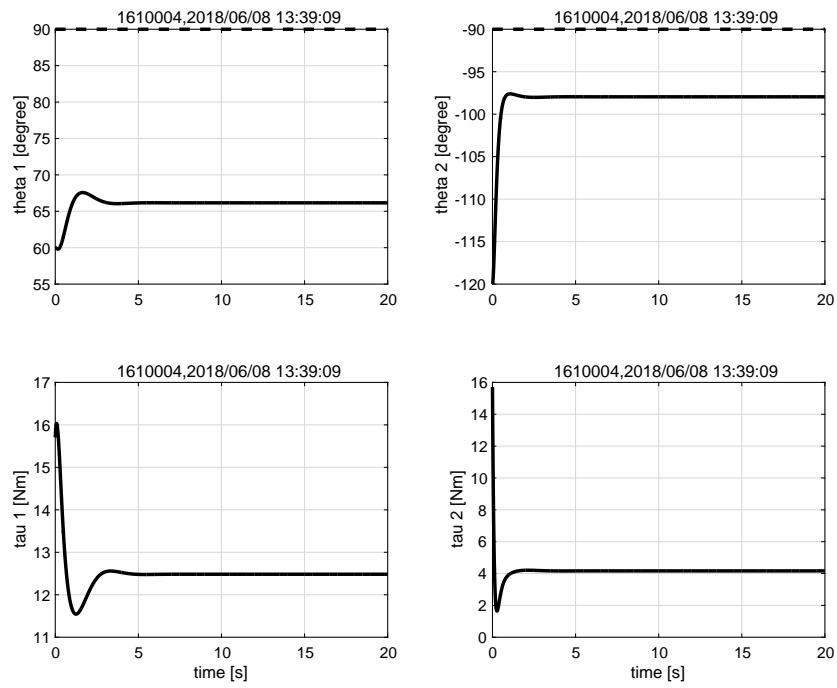


図2 制御法:PD 制御, ゲイン:中

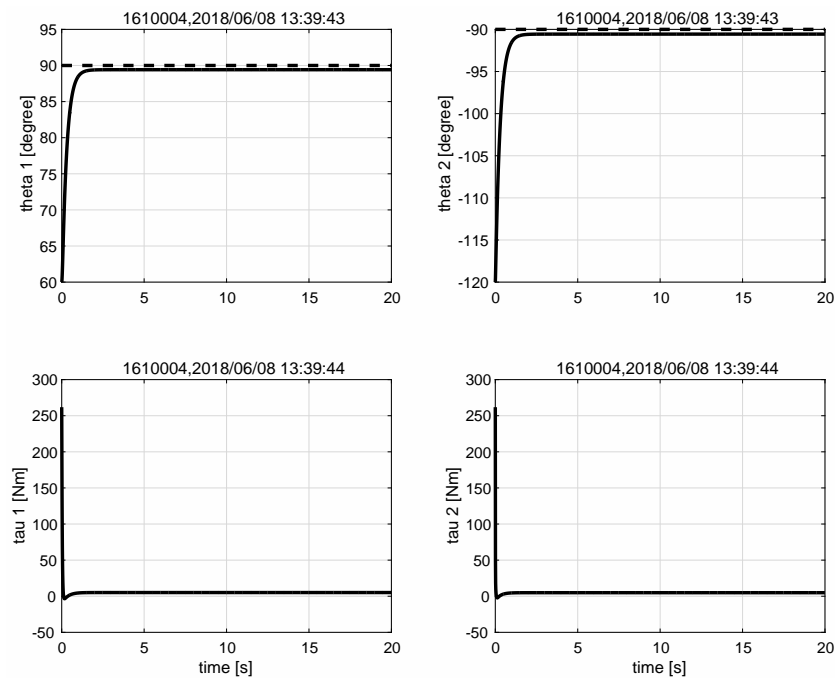


図3 制御法:PD 制御, ゲイン:大

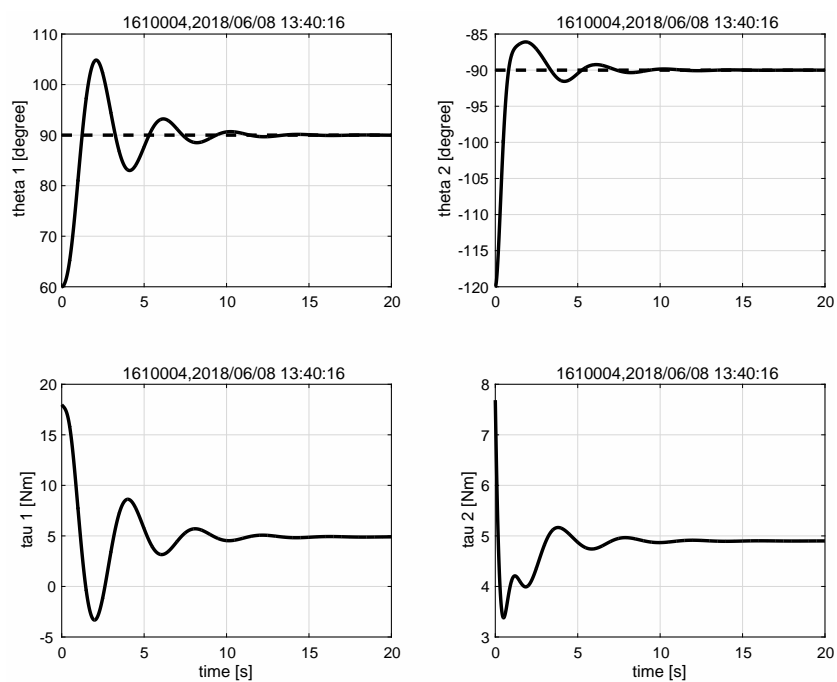


図 4 制御法:重力補償付き PD 制御, ゲイン:小

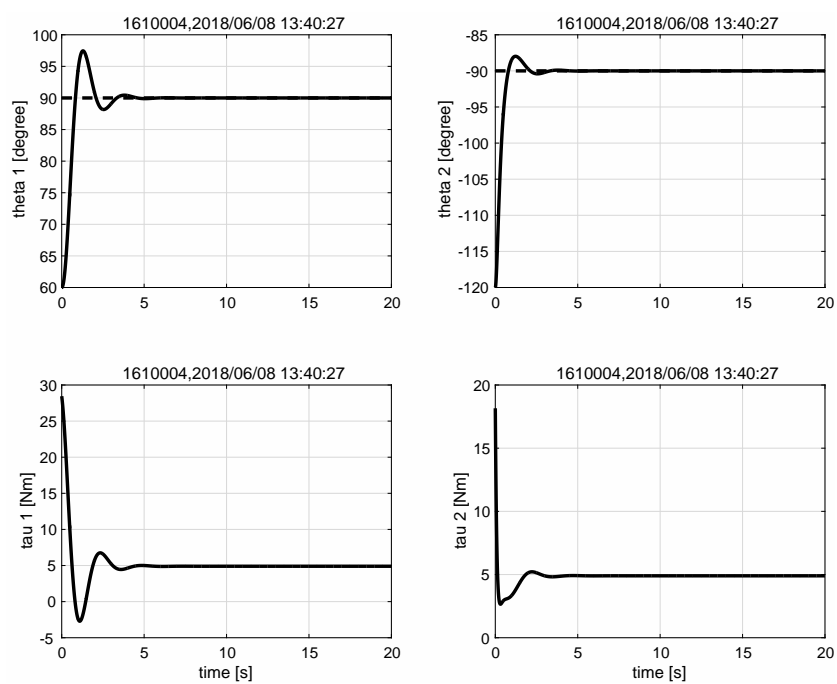


図 5 制御法:重力補償付き PD 制御, ゲイン:中

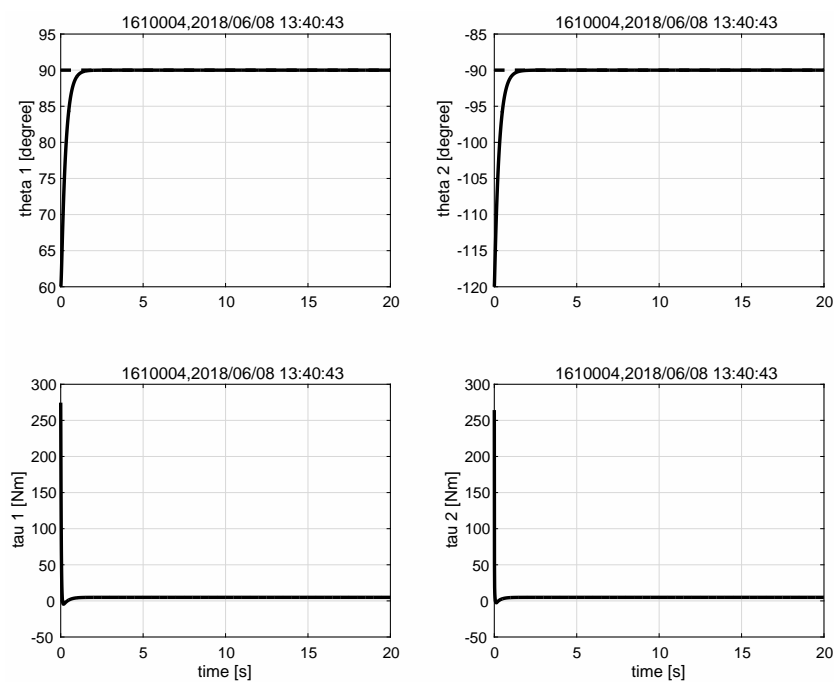


図 6 制御法:重力補償付き PD 制御, ゲイン:大

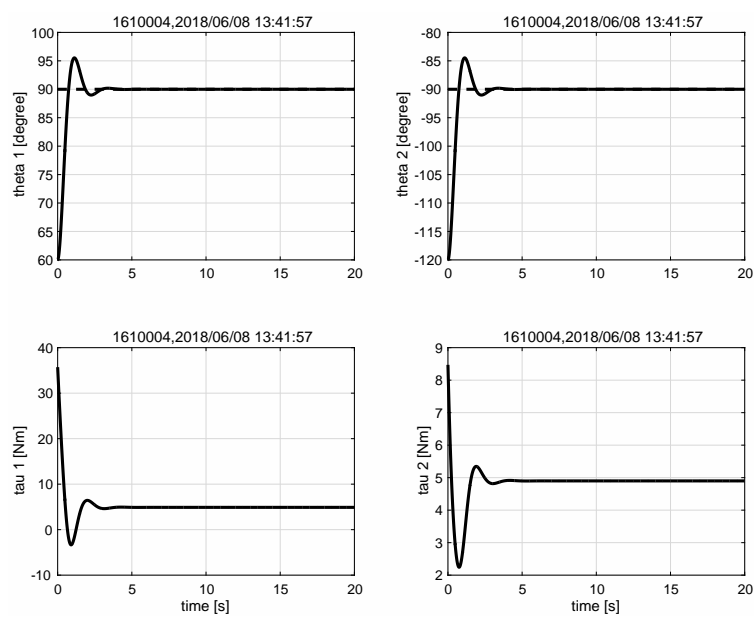


図 7 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:小

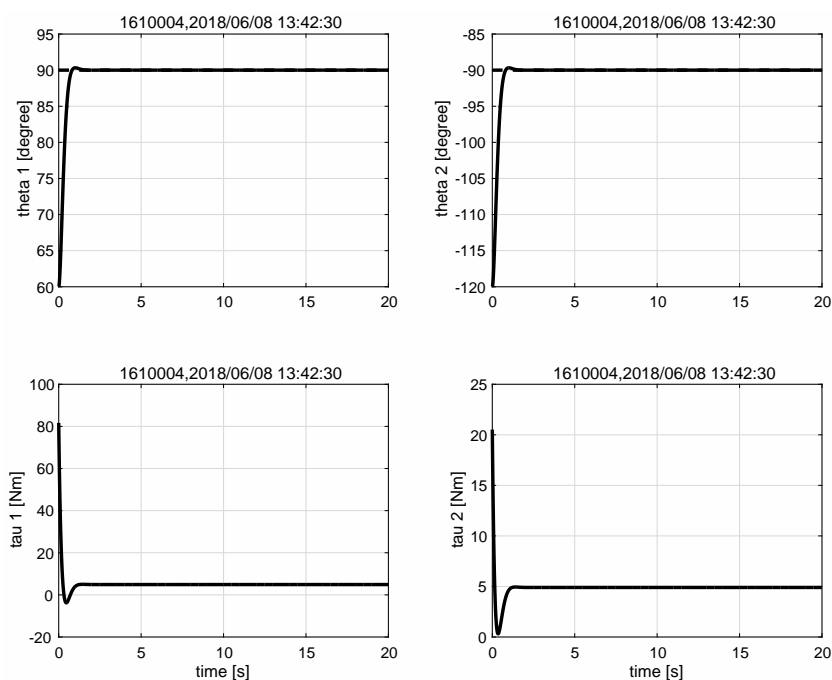


図 8 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:中

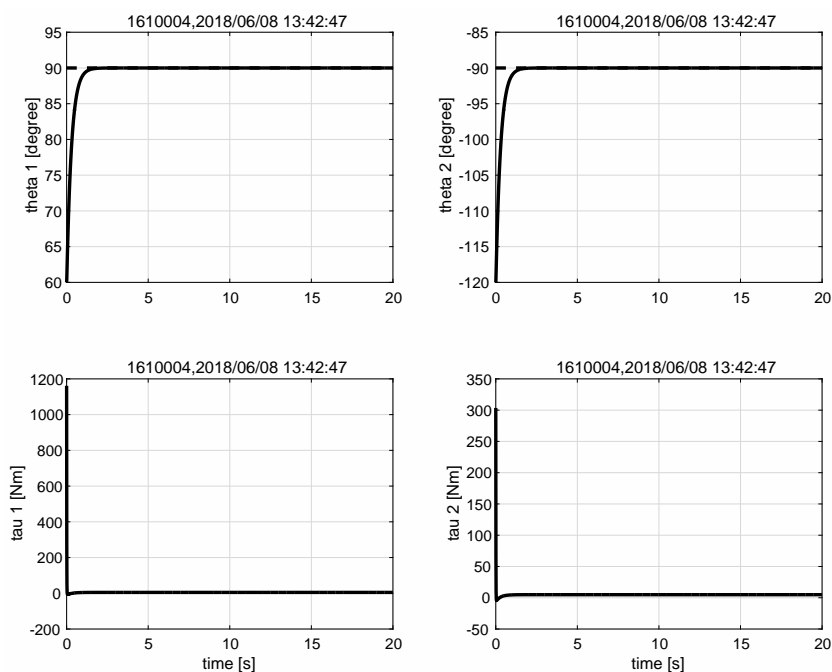


図 9 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:大

各制御法において, ゲイン小から大へのグラフの変化を見ると, ゲインが大きくなるにつれ目標値への到達時間が短くなり, オーバーシュート量も小さくなっていく。同時に, モータの出力 (τ_1, τ_2) の最大値も比例して増加していることがわかる。ゲイン中の場合でそれぞれの制御法を行った場合 (図 2, 図 5, 図 8) を比べると, 目標値への到達は FB 線形化, 重力補償つき PD 制御, PD 制御の順に速く, モータの出力の最大値は, FB 制御, 重力補償つき PD 制御, PD 制御の順に大きい。この傾向はゲイン小, 大の場合にも同様に見られるが, ゲイン大の場合では, 目標到達時間が PD 制御においてはオーバーシュートが残っているも

の、全ての制御において有意な差は見られなかった。

課題 1 で得られた結果から良好なものを選定する。良好な結果の定義として、オーバーシュート量が小さいこと、目標到達時間が速い、加えるモータの仕事が小さいことである。ロボットアームの機能として、精度が第一に優先されるため、オーバーシュートが微小なものを選定すると、FB 線形化 (ゲイン:小中大)、重力補償つき PD 制御 (ゲイン:小中大) となる。次点で、過度なモータ出力 (800~1000 N・m) は実機での動作が困難であることを考慮すると、FB 線形化 (ゲイン:小中)、重力補償つき PD 制御 (ゲイン:小中大) が残る。ここで、目標到達時間を t 、モータの出力の最大値を τ として、二つの積 α を定義し結果を評価する。 α が小さいほど少ない出力である上に目標到達時間が速く、良好な結果であると考えられる。

$$\alpha = t \times \tau \quad (1)$$

FB 線形化 (ゲイン:小中)、重力補償つき PD 制御 (ゲイン:小中大) においてそれぞれ目標到達時間とモータの出力効率を以下の表にまとめた。この時、 τ は τ_1, τ_2 の最大値の平均値をとった。

表 1 時不変, モデル誤差無しの場合の結果比較

	τ_1 の最大値	τ_2 の最大値	目標到達時間	α
重力補償つき PD 制御 (ゲイン小)	17.0	7.60	14.0	172.2
重力補償つき PD 制御 (ゲイン中)	27.5	17.5	3.70	83.25
重力補償つき PD 制御 (ゲイン大)	270	260	1.50	397.5
FB 線形化 (ゲイン小)	35.0	8.50	3.70	80.48
FB 線形化 (ゲイン中)	80.0	20.5	1.25	62.81

表 1 から、時不変, モデル誤差無しの場合では FB 線形化 (ゲイン中)、FB 線形化 (ゲイン小)、重力補償つき PD 制御 (ゲイン中) の 3 つが順に良好な結果だと考えられる。

2.2 課題 2

目標値が時変の場合について、各種制御方法を実行し、結果を観察した。その結果を以下に示す。

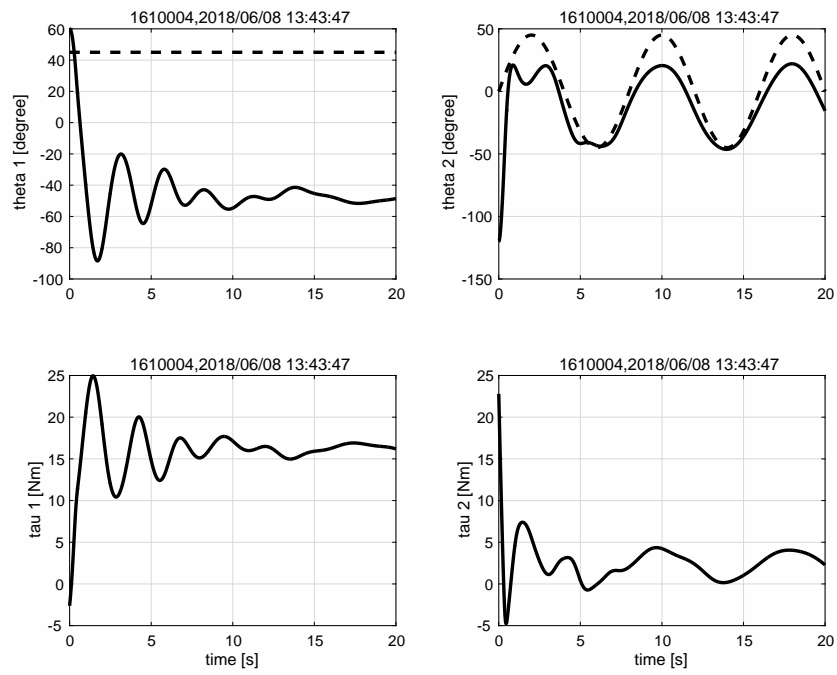


図 10 制御法:PD 制御, ゲイン:小

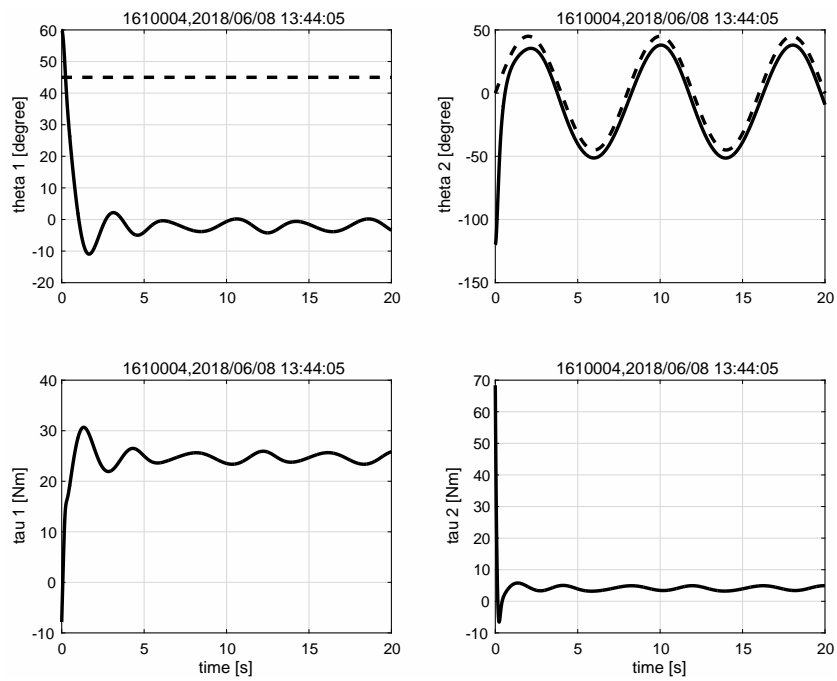


図 11 制御法:PD 制御, ゲイン:中

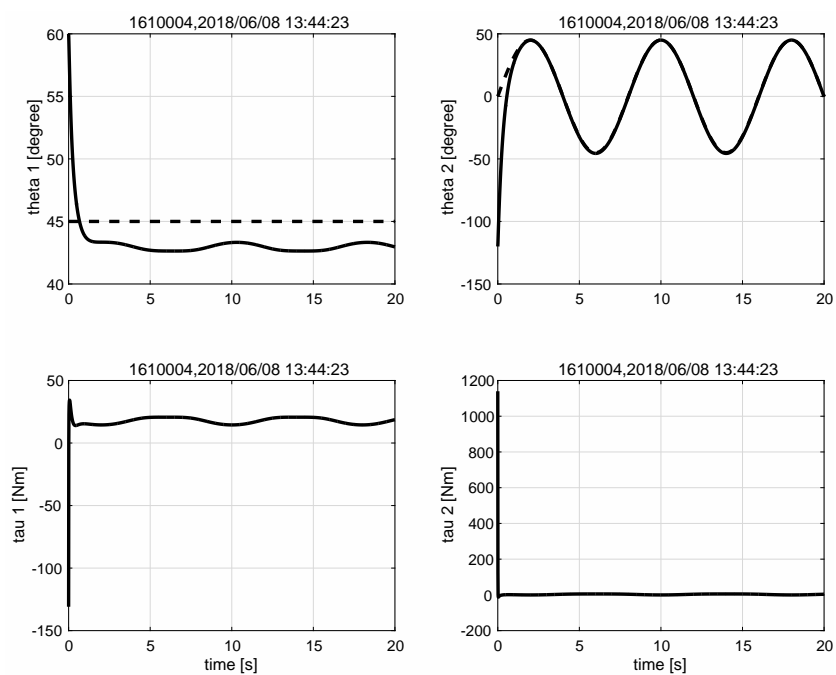


図 12 制御法:PD 制御, ゲイン:大

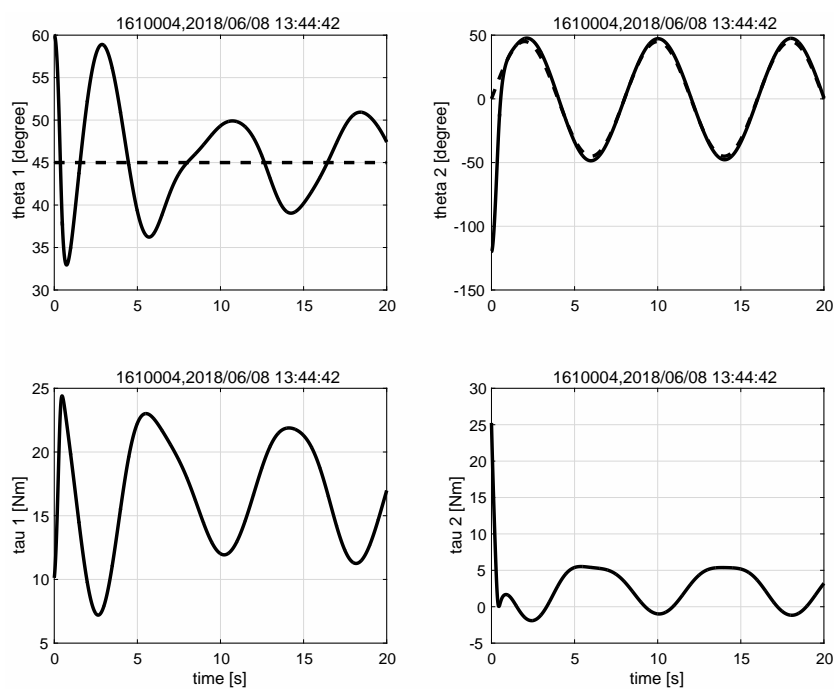


図 13 制御法:重力補償付き PD 制御, ゲイン:小

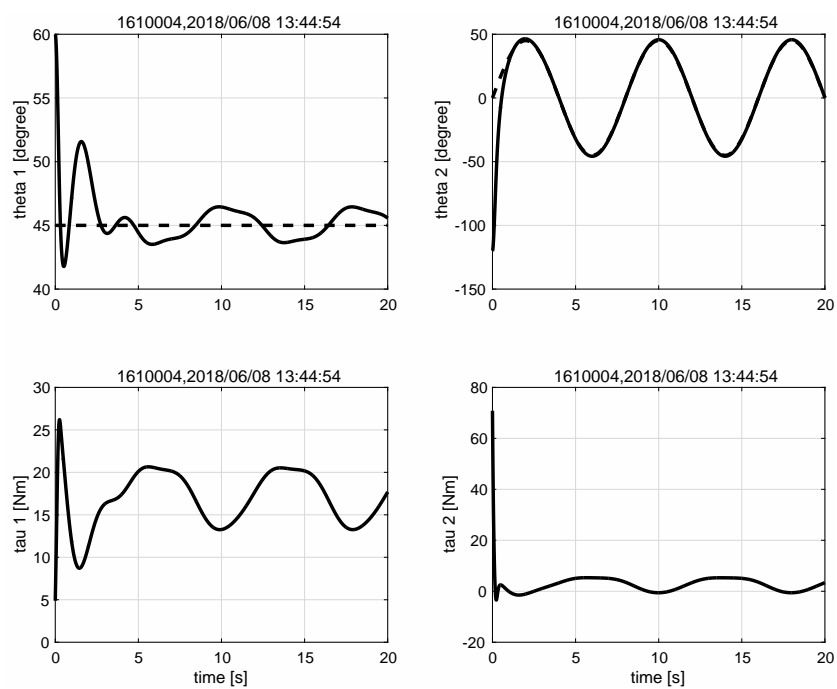


図 14 制御法:重力補償付き PD 制御, ゲイン:中

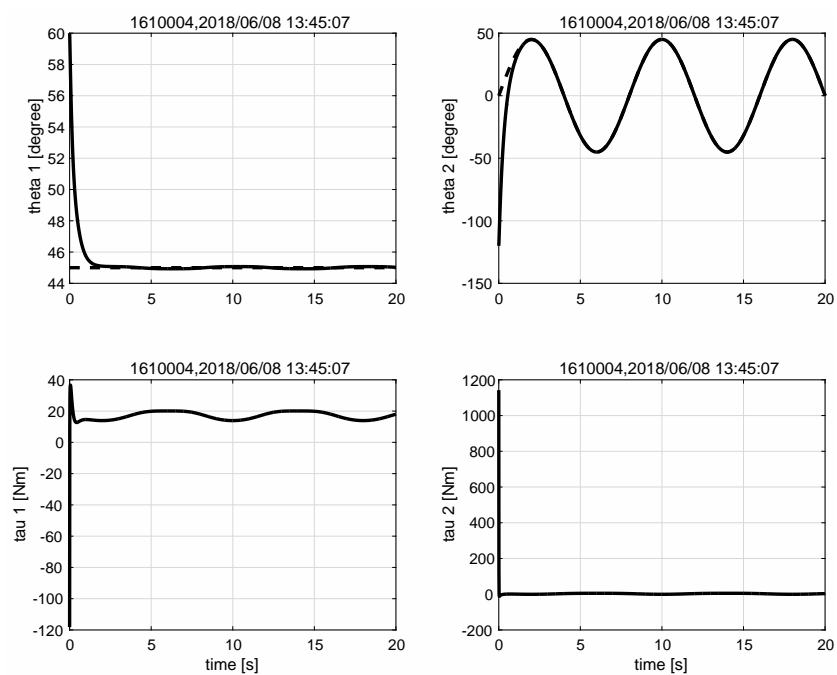


図 15 制御法:重力補償付き PD 制御, ゲイン:大

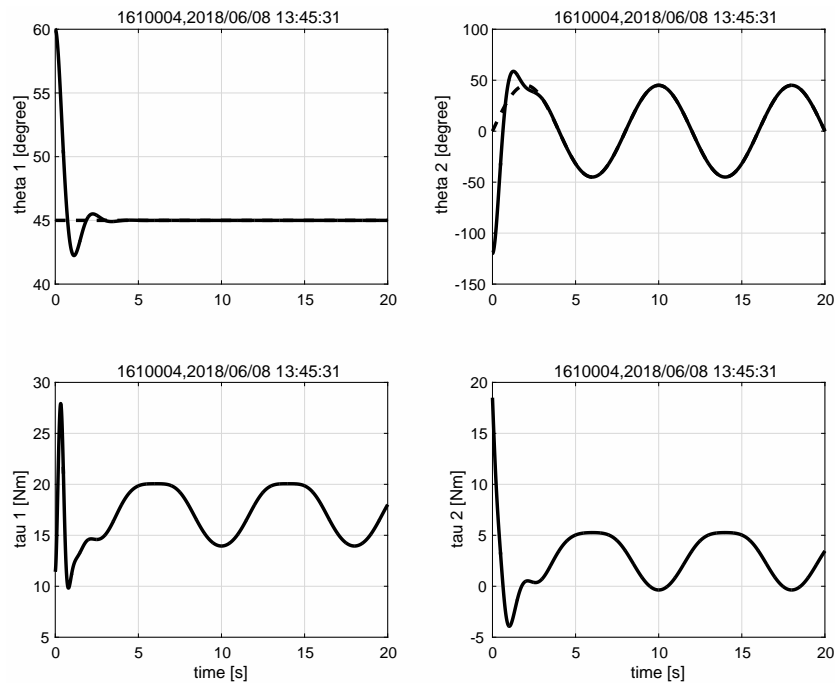


図 16 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:小

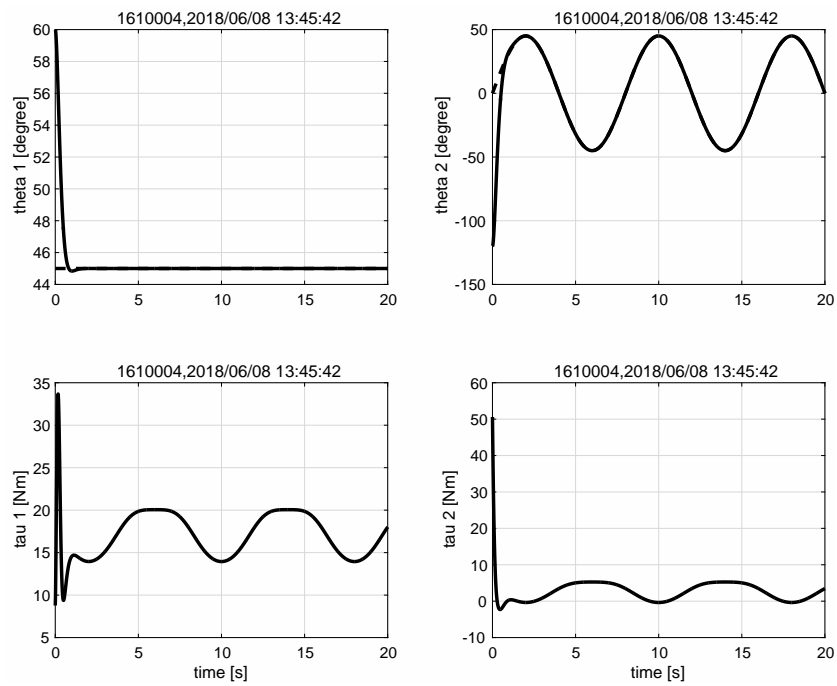


図 17 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:中

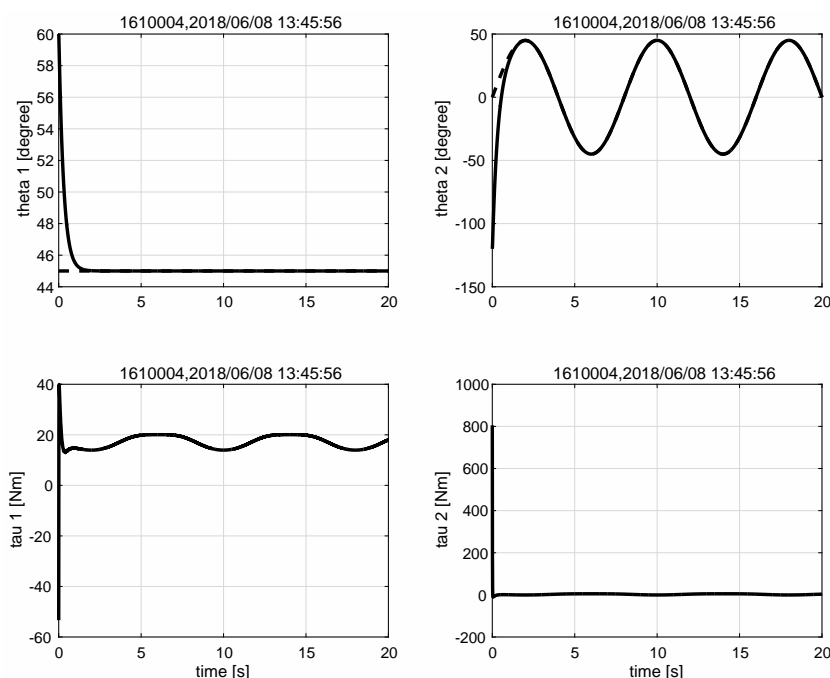


図 18 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:大

各制御法において, ゲイン小から大へのグラフの変化を見ると, 不時変の場合と同様に, ゲインが大きくなるにつれ目標値への到達時間が短くなり, オーバーシュート量も小さくなっていく。同時に, モータの出力 τ_1, τ_2 の最大値も比例して増加していることがわかる。ゲイン中の場合でそれぞれの制御法を行った場合 (図 11, 図 14, 図 17) を比べると, 目標値への到達は FB 線形化, 重力補償つき PD 制御, PD 制御の順に速く, モータの出力の最大値は, PD 制御, FB 制御, 重力補償つき PD 制御の順に大きい。

課題 2 で得られた結果から良好なものを課題 1 と同様に選定する。オーバーシュートが微小なものを選定すると, PD 制御 (ゲイン:大), 重力補償つき PD 制御 (ゲイン:大), FB 線形化 (ゲイン:小中大) となる。過度なモータ出力 (800~1000 N・m) は実機での動作が困難であることを考慮すると, FB 線形化 (ゲイン:小中) が残る。これらの結果を目標到達時間とモータの出力の最大値の積で結果を評価していく。

FB 線形化 (ゲイン:小中) においてそれぞれ目標到達時間とモータの出力効率を以下の表にまとめた。

表 2 時変, モデル誤差無しの場合の結果比較

	τ_1 の最大値	τ_2 の最大値	目標到達時間	α
FB 線形化 (ゲイン小)	27.0	17.5	3.00	66.75
FB 線形化 (ゲイン中)	34.0	50.0	1.25	52.50

表 2 から, 時変, モデル誤差無しの場合では FB 線形化 (ゲイン中), FB 線形化 (ゲイン小) の 2 つが順に良好な結果だと考えられる。この結果は重力補償つき PD 制御 (ゲイン:中) を除く 2 つは課題 1 で選定した良好な結果と一致しており, 時変, 不時変は制御結果に対してあまり影響しないと思われる。

2.3 課題 3

課題 1,2 で良好な結果が得られた制御方法とゲインの組み合わせについて、モデル誤差を「有り」に変更して制御を実行した。その結果を以下に示す。図 19～21 が時不変, 22～24 が時変の場合である。

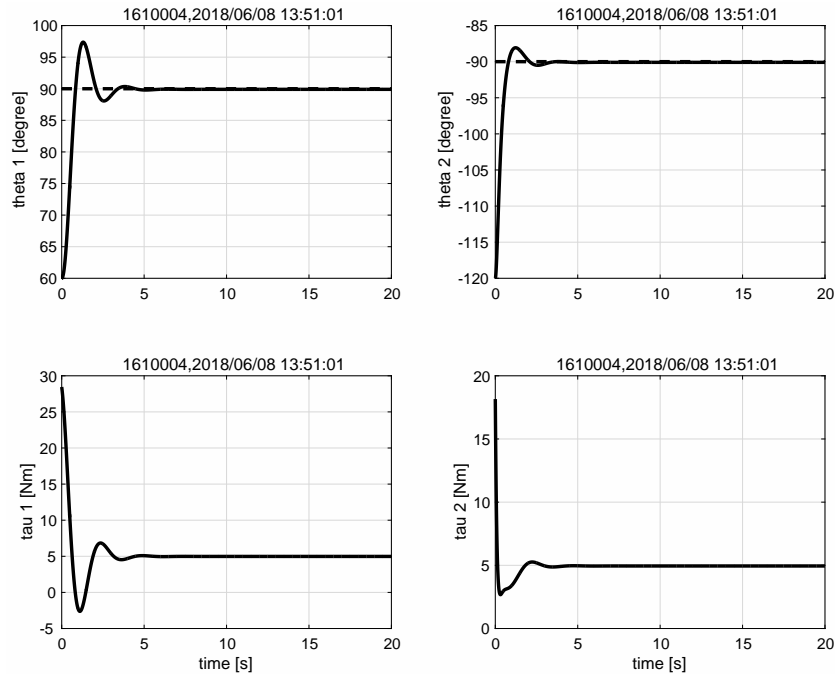


図 19 制御法:重力補償つき PD 制御, ゲイン:中

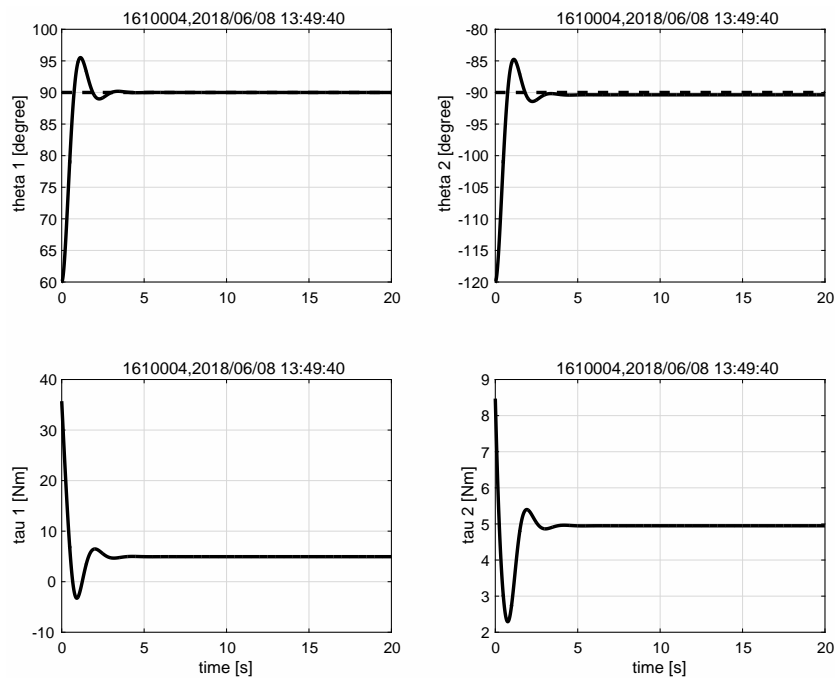


図 20 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:小

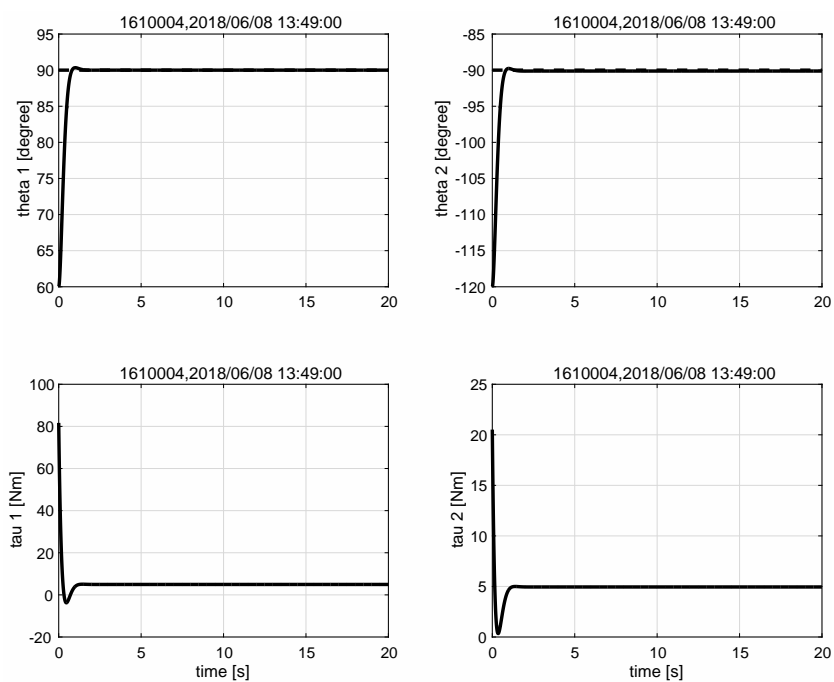


図 21 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:中

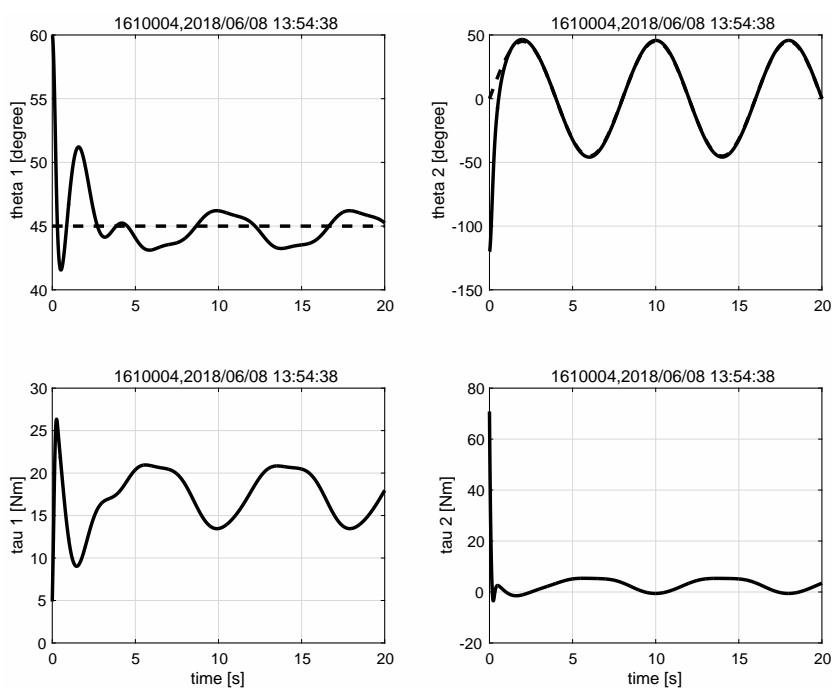


図 22 制御法:重力補償つき PD 制御, ゲイン:中

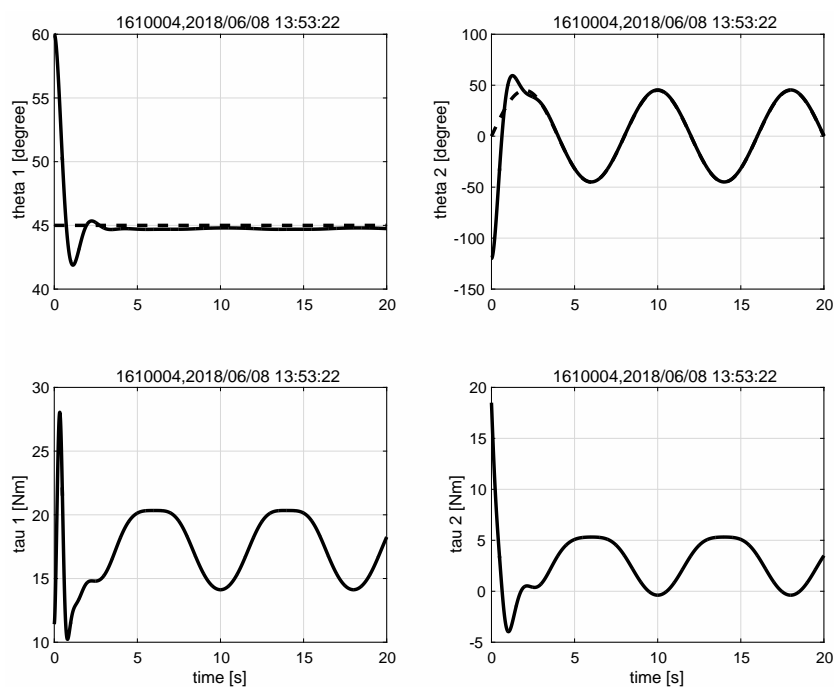


図 23 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:小

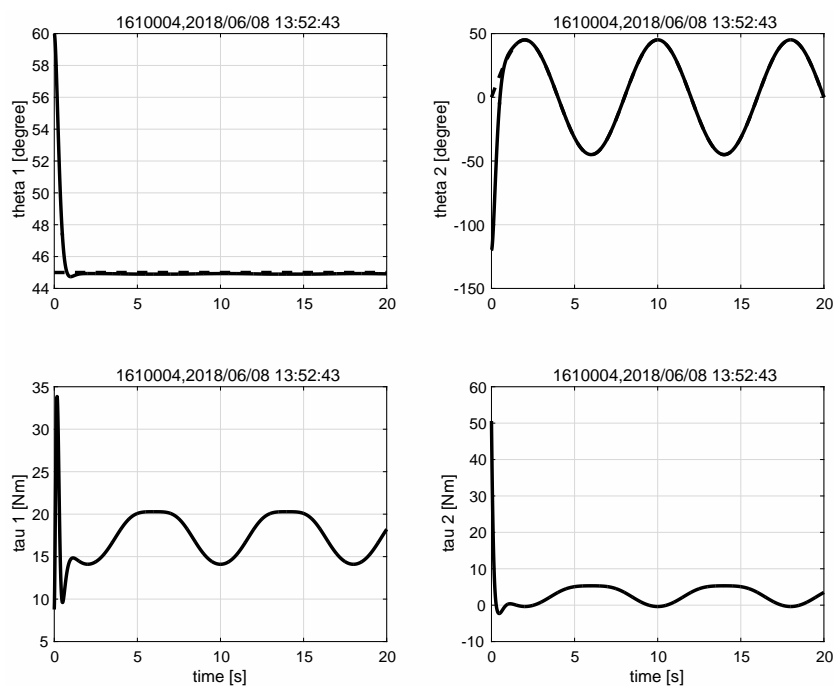


図 24 制御法:フィードバック線形化制御, ゲイン:中

時不変の場合のモデル誤差の有無を比較すると、モデル誤差無しの場合では正確に目標に到達しているが、有りの場合では θ_2 がオーバーシュートしているが、出力や目標到達時間は変化が見られない。時変の場合のモデル誤差の有無を比較すると、モデル誤差無しの場合では正確に目標に到達しているが、有りの場合では θ_1 がオーバーシュートしているが、こちらも出力や目標到達時間に変化は見られない。

これまでの結果から、より良い制御結果を得るための方策について考える。まず課題 1, 2 における選定及

び α の数値から鑑みて今回の実験では FB 制御をゲイン中程度で制御する制御法が最善であったと思われる。しかしながらこれは、非線形成分を補償し、モータ出力によって制御するものであり、摩擦力や温度変化によるアームの変化などのモデル誤差による影響が出てしまいやすい。これは課題 3 中で確認した、モデル誤差によるオーバーシュートの発生からもわかる。またセンサノイズによっても誤差が生じてしまう。そのため、PID 制御にすることによって誤差を残らないようにする制御を加えてやると良い。また、制御からは多少離れてしまうが、アームの材質に剛性のより高い材質、温度変化によって変化しにくい材質を用いることでも結果が改善されると考えられる。

2.4 課題 4

2 リンクアームを対象に、三種類での目標値での制御をシミュレーションと実機でそれぞれ実行し、結果を観察した。その結果を以下に示す。

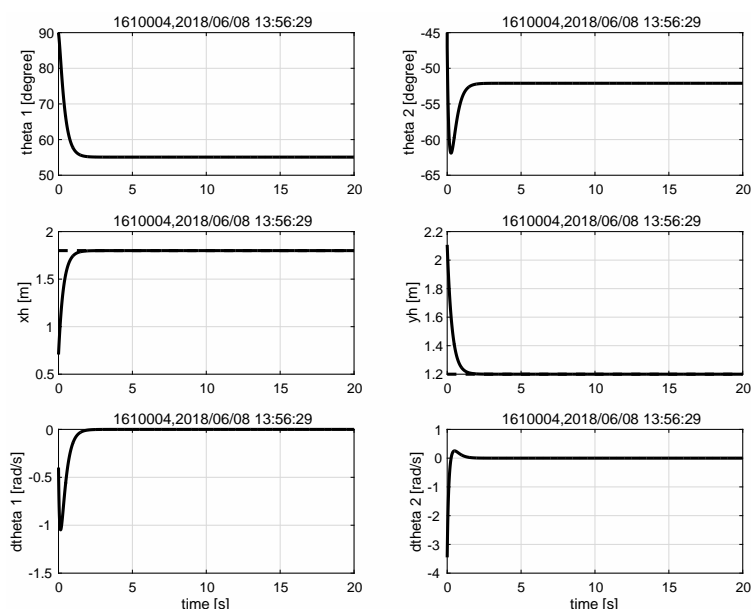


図 25 シミュレーション:時不変

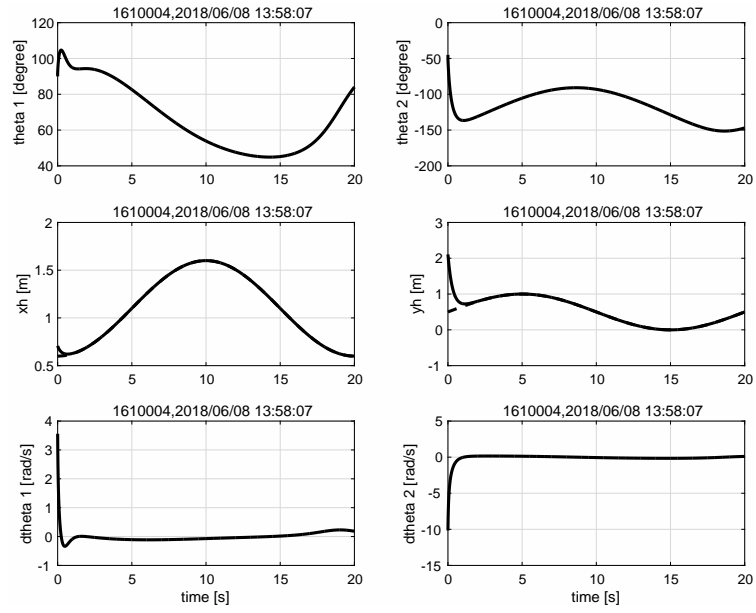


図 26 シミュレーション:時変 1

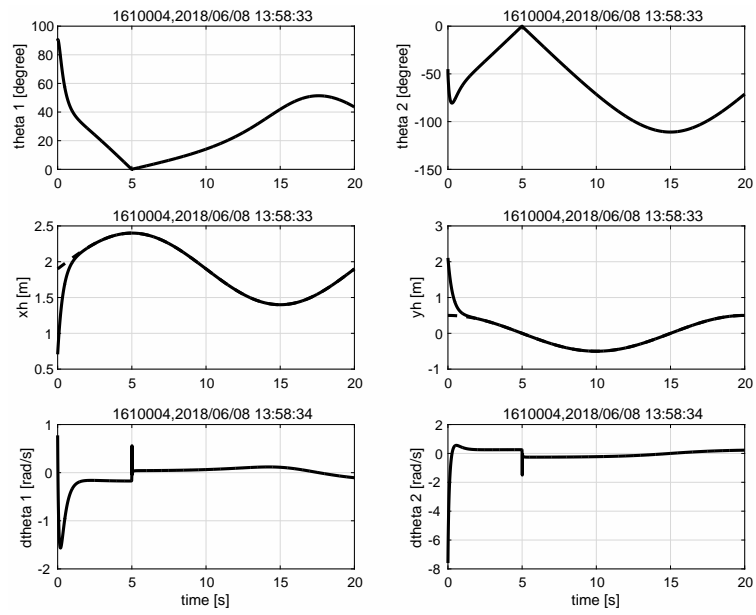


図 27 シミュレーション:時変 2

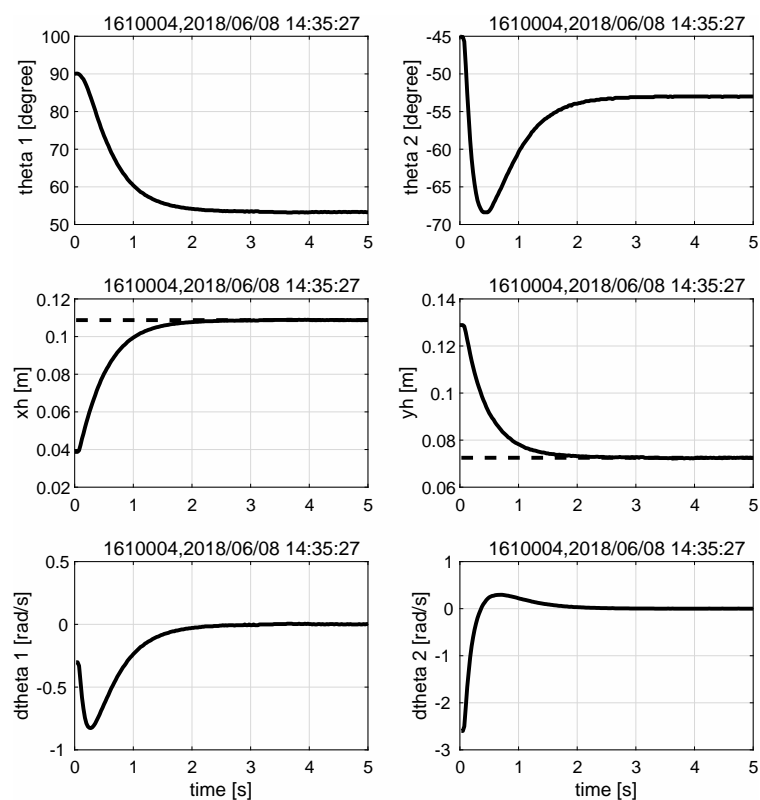


図 28 実機:時不変

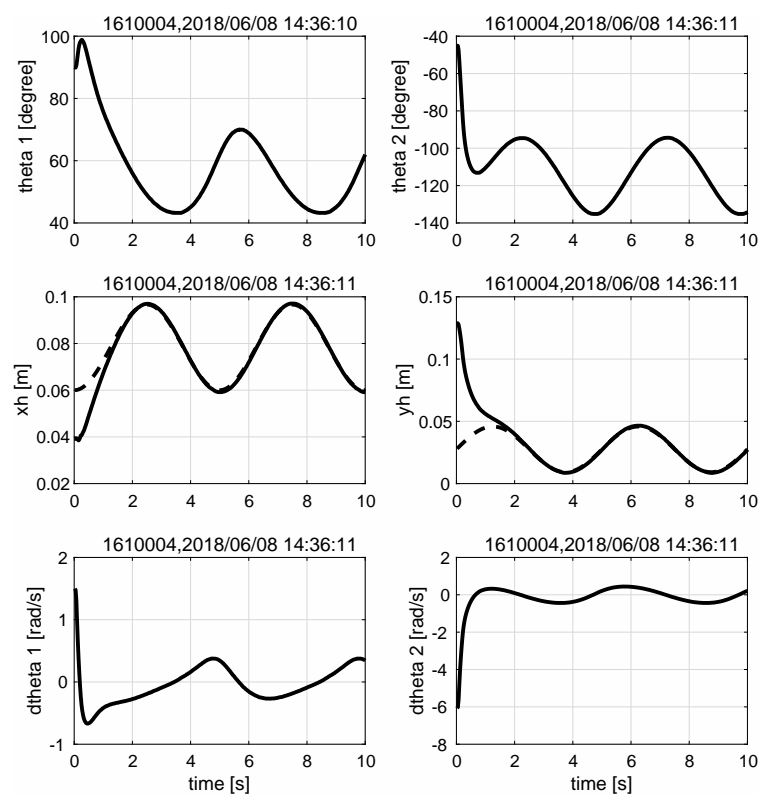


図 29 実機:時変 1

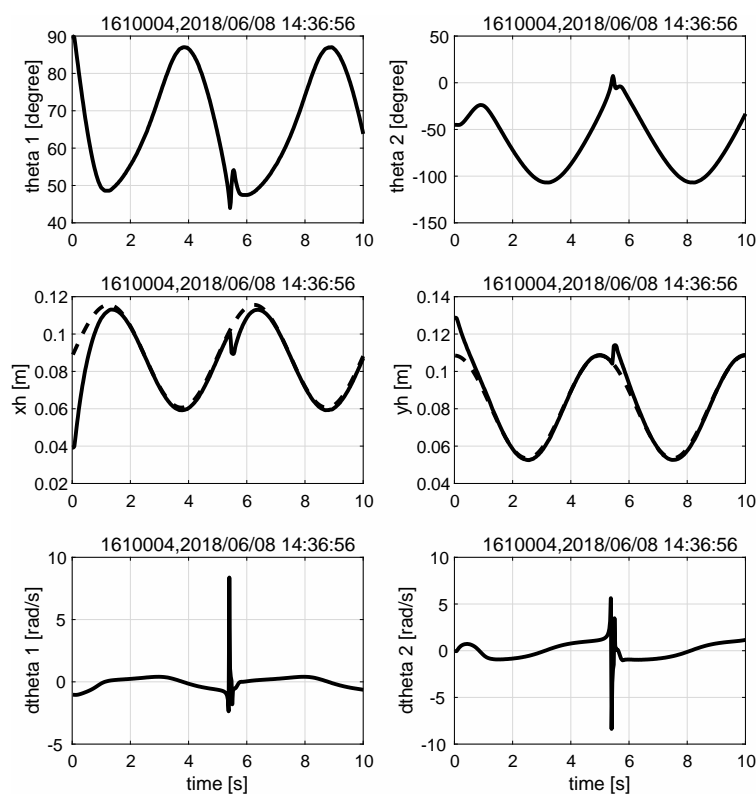


図 30 実機:時変 2

シミュレーションの目標値が時不変, 時変 1(25,26) の場合では滑らかに目標値に制御できているが, 時変 2(図 27) の場合では急激なずれが生じている。これは目標地点に向かう際 ($t=5$), ロボットが特異点となる姿勢になってしまったために正常な制御ができなくなっていると考えられる。実機でも同様に, 時変 2(30) の $t=5$ において確かに特異点となったと思われる点が見られる。

シミュレーションと実機の違いについて考察する。時変 2 の場合, 特異点に達した後, シミュレーションではすぐにリカバリーできているのに対し, 実機では特異点に達した後, リカバリーするまでに少し時間がかかっている。これは, 実機とシミュレーションの間にモデル誤差が生じていたため, 正確に制御できるまで時間がかかってしまったことよると思われる。

2.5 課題 5

冗長ロボットアームを対象に, 条件無使用, 衝突回避, 関節角度減少化, 衝突回避 + 関節角度減少化と変更して制御を実行し, 結果を観察した。その結果を以下に示す。

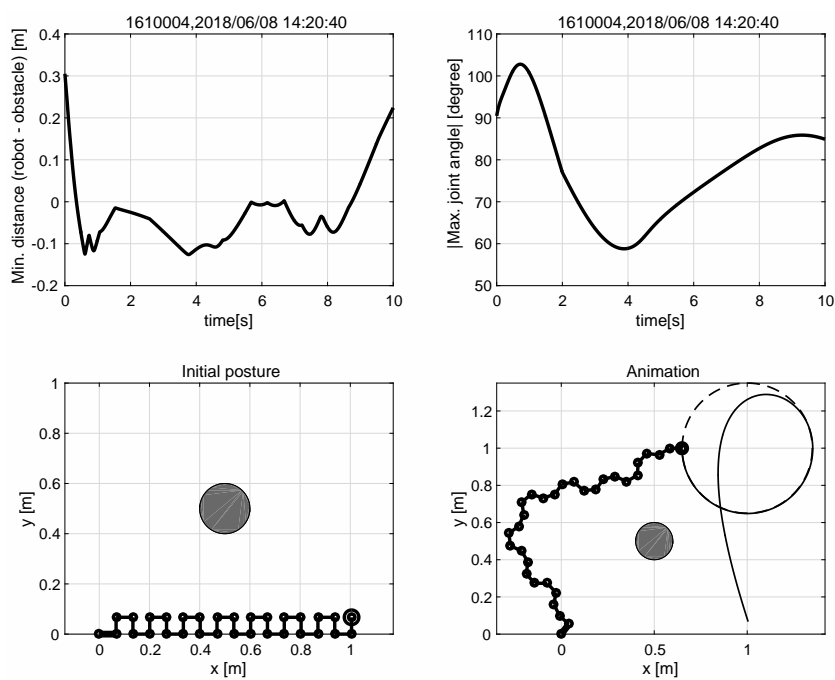


图 31 条件:未使用

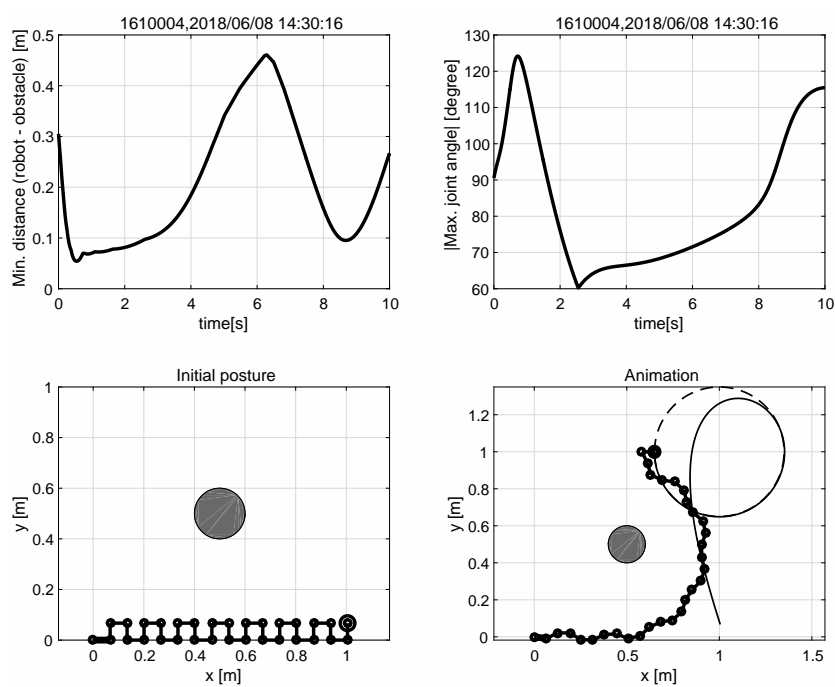


图 32 条件:衝突回避

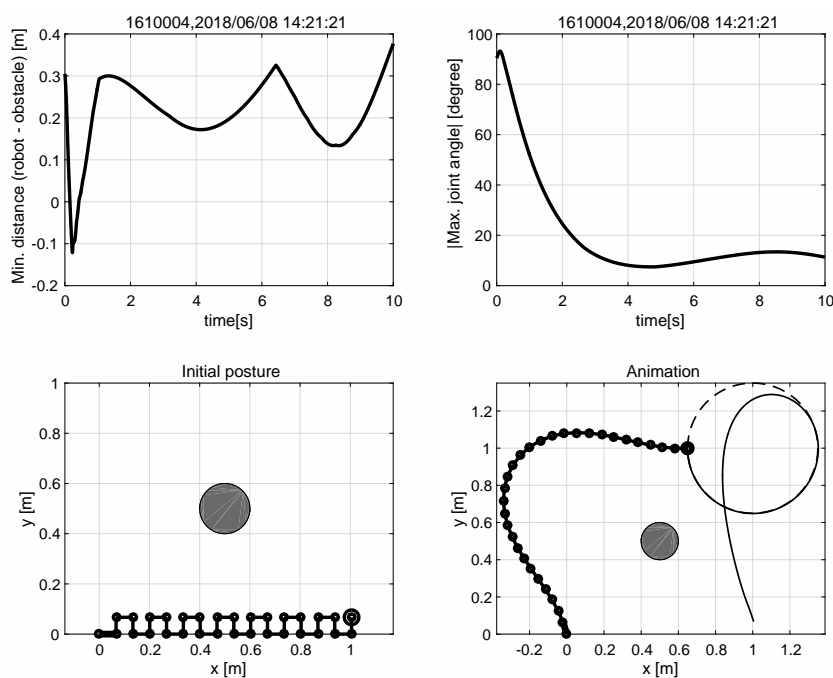


図 33 条件:関節角度減少化

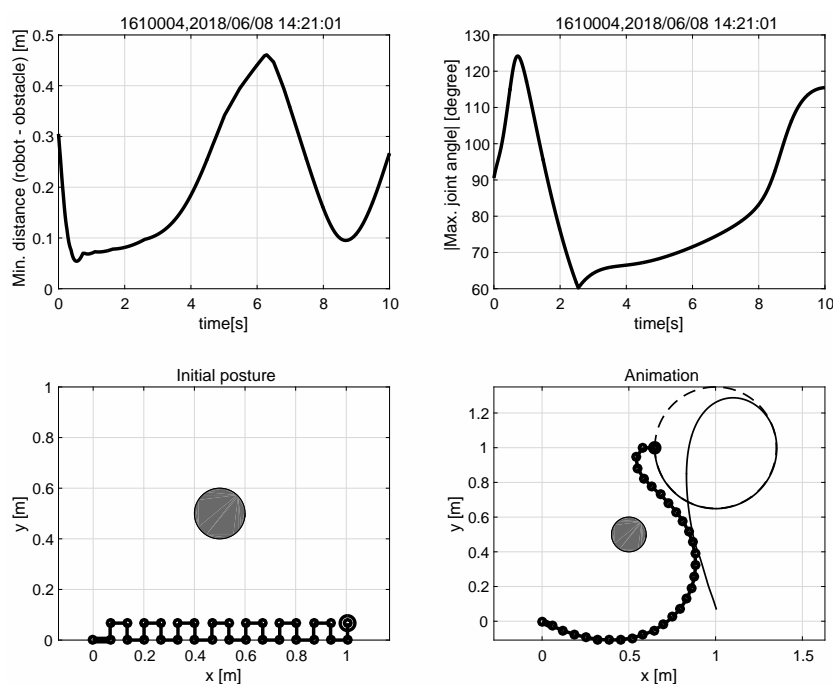


図 34 条件:衝突回避 + 関節角度減少化

それぞれの条件と制御結果について考察する。まず未使用の場合 (図 31) では目標値通りに制御できているが、障害物とロボットの距離の最小値を示したグラフを見ると負の値、つまり衝突してしまっていることがわかる。これは制御パラメータの中に障害物との距離が考慮されていないためによるものである。そこで、衝突回避の条件を付加した場合 (32) について見る。未使用の場合とほぼ変わらない精度で制御できており、障害物とロボットの距離の最小値も 0 を下回っていない。しかしながら、関節角度の最小値は、未使用の場合では滑らかなグラフ、つまり関節への負荷が小さいのに対し、衝突回避の場合では 2.5 秒付近で大きな負

荷がかかってしまっていることがわかる。次に関節角度減少化の条件について考える。こちら未使用の場合と精度はほぼ変わっていないが、さらに関節角度の変化が滑らかになっており、関節への負荷が少ない。しかし、障害物と衝突してしまっている。最後に、衝突回避と関節角度最小化を組み合わせた制御について見ていく。この条件の時にはロボットと障害物の最小値のグラフは衝突回避の場合と一致し、関節角度の最大値のグラフは関節角度最小化の場合と一致している。つまり、制御パラメータに実現したい制御を満たすような条件を付加していくことで改善できることがわかる。

3 レポート課題

3.1 課題 A: ロボット制御における「特異点」「特異姿勢」の種類を数学的意味、物理的意味を交えて説明する。また、「特異点」「特異姿勢」を回避するための方法を説明する。

「特異点」「特異姿勢」はロボットがある特定の姿勢に達した際に、制御するための解が計算不可能になり、一時的に制御不能になる点のことである。ここで、特異点について数学的に説明していく。原点からロボットの手先位置へのベクトルを \mathbf{P} とし、各関節角の変位のベクトルを $\boldsymbol{\theta}$ とすると、出力点の速度に対する関節角の変位の速度はヤコビ行列を用いて次のように表される。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{P}} \quad (2)$$

この式が解を持つためには \mathbf{J}^{-1} に逆行列が存在している必要がある。逆に \mathbf{J}^{-1} の逆行列が存在しない場合、すなわち以下の式が成り立つ時、入力に対して出力不可能な姿勢となる。[1]

$$\det \mathbf{J}^{-1} = 0 \quad (3)$$

このことを次に示す 2 自由度マニピュレータリンク (図 35) を例にとって考えてみる。

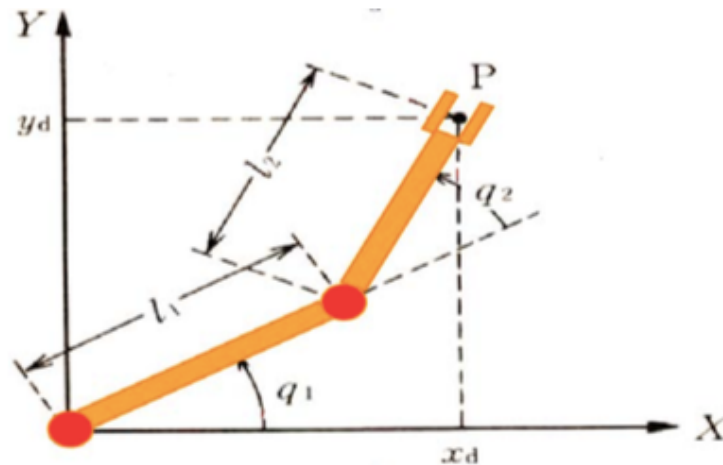


図 35 2 自由度マニピュレータリンク

このマニピュレータリンクのヤコビ行列は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) & -l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) & l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

このヤコビ行列の行列式を求めると以下のようになる.

$$\det \mathbf{J}^{-1} = l_1 l_2 \sin q_2 \quad (5)$$

すなわち, $q_2 = 0^\circ, 180^\circ$ の時, このマニピュレータリンクは特異点となる. $q_2 = 0^\circ$ の時, アームが伸びきった状態になってしまう (図 36).

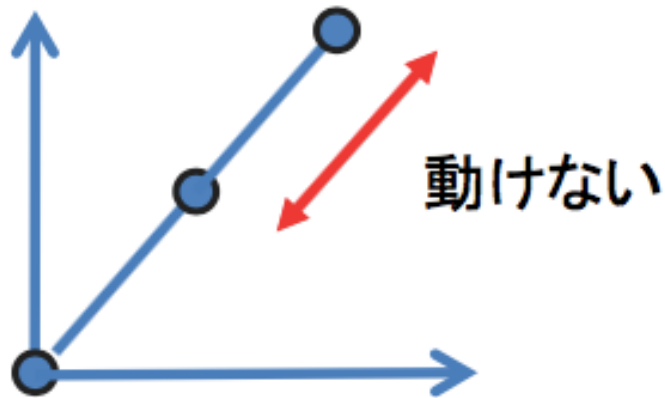


図 36 0degree

$q_2 = 180^\circ$ の時, アームが伸びきった状態になってしまう (図 37).

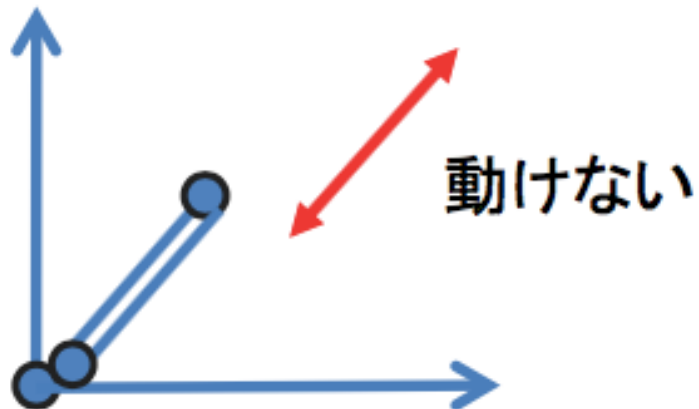


図 37 180degree

以上二つの状態を見ると, 2 自由度であるのに関わらず, 1 自由度の運動しかできない状態になっていることがわかる.[2]

3.2 課題 B:「今年度」または「昨年度」に行われたロボットの研究論文の調査

3.2.1 各種情報

論文タイトル: Smooth joint motion planning for high precision reconfigurable robot manipulators,
研究機関:University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland (SUPSI),
研究者:S.Baraldo, A.Valente, 雑誌名:IEEE

3.2.2 研究目的

現代で生じている急速な技術革新に工業用ロボットを対応させるためには、再構成可能な設計をしないといけない。しかしながら、高精度かつ信頼性の高い、再構成可能な設計は依然として主要課題のままである。そのため、この研究では精密性と再構成可能という性質を兼ね備えた、あらゆる作業に対応可能なマニピュレータ”ReRob I”の設計、制御の実現を目的とする。

3.2.3 ロボットの構造

作業を実行可能な性能とサイズからリンクとアクチュエータの両方を選定することで再構成可能にしている。ReRob I は 2 種類のジョイントから構成されており、高トルクの 3 つのジョイントと低トルクの 3 つのジョイントからなっている。

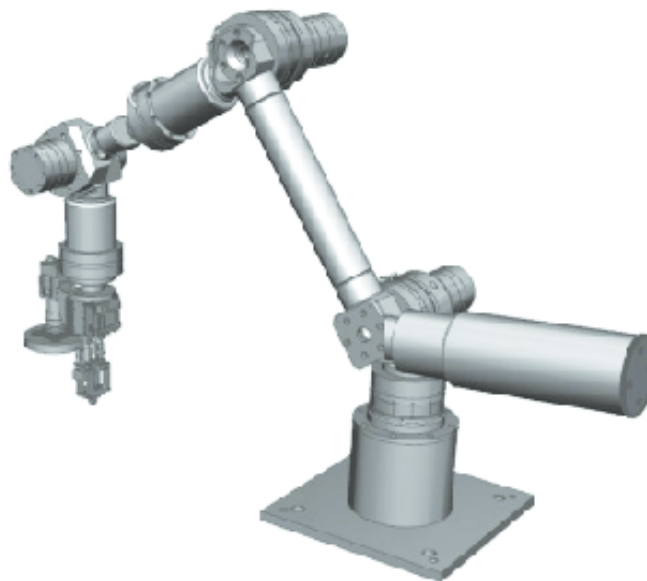


図 38 ReRob の概形

3.2.4 制御方法

滑らかな軌道とアームに生じる不要な振動や負荷を軽減する動きを実現するために、ジャーク、加速度、速度を固定値のままにしながら、すべてのジョイントのモーションプロファイルを同期させて同時に移動を完了させる。これはすべての 6 つの関節のモーションプロファイルを一度に考慮に入れ、非線形補償付き最適化を設定することに相当しており、特定の作業要件と並行して、キネマティックチェーンの相対ジョイ

ント位置に関するモーション機能を活用する.

3.2.5 得られた結果

この制御方法を用いることで, モーションプロファイルを滑らかに維持しながら, 現在最善とされている方法よりも 39% 以上短い時間で作業を実行することができた.

3.2.6 感想と意見

再構成可能にしたというロボットの構造がなぜ再構成可能なのが理解しきれなかった. また, 制御方法について述べられている部分もどのような制御構造になっているのか, なにが従来と革新的に違うのかが理解できなかった.

4 参考文献

[1] 金沢大学 理工学域 機械工学類 機械機能設計研究室 HP より, URL:<http://da.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/lab/tachiya/text/robot/2.pdf> [2] 明 愛国: Webclass: ロボットの機構と力学

5 実験に対する意見・感想

全体を通して, ロボットの特徴や問題点について体形だった実験であったので理解しやすく, 今までの学習した事柄について総ざらいできたため, 大変勉強になった. 課題 1, 2 における時変と不時変による制御結果の違いの考察がうまくできず心残りである. 課題 4, 5 では講義で学んだ特異点について実際に実機でどのように動作するのか確認できたことが非常に興味深かった.