

オフセット圧力調整による可変剛性空気圧
アクチュエータの制御

以後 直樹

システム情報工学研究科
筑波大学

2013年3月

概要

本研究は、空気圧アクチュエータの制御において、オフセット圧力を適切に調整することにより、少ないオーバーシュート、早い応答、高い追従性を実現することを目的とした。

その制御方法は、推進側チャンバのみに供給される P 制御とオフセット圧力の D 制御を組み合わせた制御方法である。

この制御方法は、2 個の制御ゲインで構成させるが、同じ制御ゲイン数である PD 制御と比較して、立ち上がり時間を早くすることが可能であり、ランプ入力の追従性も 2 倍以上することが可能である。また、制御ゲイン数が多い PID 制御と比較しても、同程度以上の性能で制御することが可能である。特に、PID 制御は、I 制御を含むために外乱に対して、弱い点があるが、本研究が提案する制御方法は、そのような外乱に対して、影響を受ける制御要素がないため、安定的な制御が可能となる。従って、本研究は、空気圧アクチュエータにおける、最適な制御の 1 つを提案することができた。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	空気圧アクチュエータ	3
2.1	三大アクチュエータ	3
2.1.1	モータ	3
2.1.2	油圧アクチュエータ	3
2.1.3	空気圧アクチュエータ	4
2.2	エアシリンダ	5
2.2.1	空気圧の単位	5
2.2.2	エアシリンダの動作原理	5
2.2.3	オフセット圧力	7
2.3	空気圧アクチュエータの制御に対する従来研究	8
第3章	システム構成	9
3.1	制御対象のモデル化	9
3.2	P制御	10
3.3	オフセット圧力の制御	11
3.4	システム全体の制御	15
第4章	オフセット圧力制御の制御ゲイン	16
4.1	制御ゲインの決定方法	16
4.2	制御ゲインの数値変化による制御への影響	19
第5章	オフセット圧力と制御ゲイン	22
5.1	基本オフセット圧力と制御ゲインとの関係	22
5.2	負荷の変化に対する影響	39
第6章	制御実験	42
6.1	ロボットアーム概要	42
6.1.1	関節の名称	43
6.1.2	空気圧の流れ	44
6.1.3	電気信号の流れ	45
6.2	PD制御とPID制御における制御ゲインの選定	46
6.3	ステップ入力とランプ入力による評価実験	47
6.4	PID制御との追従性の比較	52
6.5	外乱による影響	55
第7章	まとめ	58
	謝辞	59
	参考文献	60
	論文リスト	61

図目次

図 2.1	複動式エアシリンダ概念図	6
図 2.2	オーバシュート抑制時における各チャンバの指令圧力	8
図 3.1	P制御における目標値 30[deg]の角度変化	12
図 3.2	P制御における目標値 30[deg]の偏差変化	12
図 3.3	P制御における目標値 30[deg]の積分値変化	13
図 3.4	P制御における目標値 30[deg]の速度変化	13
図 3.5	非オーバシュート抑制時における各チャンバの指令圧力	14
図 3.6	オーバシュート抑制時における各チャンバの指令圧力	14
図 3.7	肩屈伸関節におけるシリンダロッド側チャンバのブロック線図	15
図 4.1	P制御のみにおける角度変化	16
図 4.2	P制御のみにおける発生力変化	17
図 4.3	P+オフセット圧力制御における角度変化	17
図 4.4	P+オフセット圧力制御における発生力変化	18
図 4.5	オフセット圧力制御ゲイン適正值の 0[%]における角度変化	19
図 4.6	オフセット圧力制御ゲイン適正值の 50[%]における角度変化	20
図 4.7	オフセット圧力制御ゲイン適正值の 100[%]における角度変化	20
図 4.8	オフセット圧力制御ゲイン適正值の 150[%]における角度変化	21
図 5.1	ゲイン設定時の角度変化 (基本オフセット圧力 2.0[atm])	22
図 5.2	基本オフセット圧力 1.0[atm]時の角度変化	23
図 5.3	基本オフセット圧力 1.1[atm]時の角度変化	23
図 5.4	基本オフセット圧力 1.2[atm]時の角度変化	24
図 5.5	基本オフセット圧力 1.3[atm]時の角度変化	24
図 5.6	基本オフセット圧力 1.4[atm]時の角度変化	25
図 5.7	基本オフセット圧力 1.5[atm]時の角度変化	25
図 5.8	基本オフセット圧力 1.6[atm]時の角度変化	26
図 5.9	基本オフセット圧力 1.7[atm]時の角度変化	26
図 5.10	基本オフセット圧力 1.8[atm]時の角度変化	27
図 5.11	基本オフセット圧力 1.9[atm]時の角度変化	27
図 5.12	基本オフセット圧力 2.0[atm]時の角度変化	28
図 5.13	基本オフセット圧力 2.1[atm]時の角度変化	28
図 5.14	基本オフセット圧力 2.2[atm]時の角度変化	29
図 5.15	基本オフセット圧力 2.3[atm]時の角度変化	29
図 5.16	基本オフセット圧力 2.4[atm]時の角度変化	30
図 5.17	基本オフセット圧力 2.5[atm]時の角度変化	30
図 5.18	基本オフセット圧力 2.6[atm]時の角度変化	31
図 5.19	基本オフセット圧力 2.7[atm]時の角度変化	31
図 5.20	基本オフセット圧力 2.8[atm]時の角度変化	32
図 5.21	基本オフセット圧力 2.9[atm]時の角度変化	32
図 5.22	基本オフセット圧力 3.0[atm]時の角度変化	33

図 5.23	基本オフセット圧力 3.1[atm]時の角度変化	33
図 5.24	基本オフセット圧力 3.2[atm]時の角度変化	34
図 5.25	基本オフセット圧力 3.3[atm]時の角度変化	34
図 5.26	基本オフセット圧力 3.4[atm]時の角度変化	35
図 5.27	基本オフセット圧力 3.5[atm]時の角度変化	35
図 5.28	基本オフセット圧力 3.6[atm]時の角度変化	36
図 5.29	基本オフセット圧力 3.7[atm]時の角度変化	36
図 5.30	基本オフセット圧力 3.8[atm]時の角度変化	37
図 5.31	基本オフセット圧力 3.9[atm]時の角度変化	37
図 5.32	基本オフセット圧力 4.0[atm]時の角度変化	38
図 5.33	棒状重り負荷の角度変化	39
図 5.34	負荷なしの角度変化	40
図 5.35	樹脂製ハンドモック負荷の角度変化	40
図 5.36	制御ゲイン再調整による樹脂製ハンドモック負荷の角度変化	41
図 5.37	制御ゲイン再調整による樹脂製ハンドモック+500[g]負荷の角度変化	41
図 6.1	7自由度を持つロボットアーム	42
図 6.2	肩屈伸関節におけるエアシリンダロッドストロークと関節角度	43
図 6.3	空気圧の流れ	44
図 6.4	システム全体の電気信号の流れ	45
図 6.5	ランプ入力増加率 2.0[deg/s]における PD 制御の角度変化	48
図 6.6	ランプ入力増加率 2.0[deg/s]における PID 制御の角度変化	48
図 6.7	ランプ入力増加率 2.0[deg/s]における P+オフセット圧力制御の角度変化	49
図 6.8	ランプ入力増加率-2.0[deg/s]における PD 制御の角度変化	49
図 6.9	ランプ入力増加率-2.0[deg/s]における PID 制御の角度変化	50
図 6.10	ランプ入力増加率-2.0[deg/s]における P+オフセット圧力制御の角度変化	50
図 6.11	PID 制御 $40+0.5t^2$	52
図 6.12	P+オフセット圧力制御 $40+0.5t^2$	53
図 6.13	PID 制御 $40+\sin(4t)$	53
図 6.14	P+オフセット圧力制御 $40+\sin(4t)$	54
図 6.15	PID 制御に対するステップ状外乱	56
図 6.16	P+オフセット圧力制御に対するステップ状外乱	56
図 6.17	PID 制御に対するスパイク状外乱	57
図 6.18	P+オフセット圧力制御に対するスパイク状外乱	57
表 6.1	PD 制御, PID 制御, P+オフセット圧力制御の比較 (ランプ入力 2.0[deg/s])	51
表 6.2	PD 制御, PID 制御, P+オフセット圧力制御の比較 (ランプ入力-2.0[deg/s])	51

第1章 はじめに

アクチュエータの動力源としては、電磁力、超音波、空気圧、油圧などがある。それぞれの動力源が、アクチュエータに用いられている例としては、電磁力や超音波は、主にモータの動力として用いられている。空気圧や油圧は、主にシリンダの動力として用いられている。

アクチュエータとしてのモータは、幅広い分野で使用されている。また、油圧アクチュエータは、工事現場で使用される重機のような大きなパワーを必要とする場面において、見かけることができる。そして、空気圧アクチュエータは、我々の日常生活においてはあまりなじみのないものを感じると思われている。しかし、空気圧アクチュエータは、バスや電車のドア開閉のアクチュエータ、テーマパーク等のアミューズメント施設で活躍する人形のアクチュエータとして広く利用されている。さらに、生産現場においては、モータよりも多くの空気圧アクチュエータが利用されていると言われている。この様に多く利用されている空気圧アクチュエータではあるが、単純な作業に利用されていることが大半を占める。これは、空気圧が持つ膨張圧縮性のために、制御が他の動作方式と比べて難しいことや、エアコンプレッサなどの付帯装備が必要という問題点があるためだと考えられる。しかし、空気圧アクチュエータは、機械構造的に単純なため堅牢であり、使用環境の影響を受けにくく、使用環境をクリーンに保つことができるなどの他の動作方式と比較して、有利な点も有している。

そのため、空気圧アクチュエータを用いた研究が少しずつ注目されてきている。例えば、ゴム人工筋を用いて人の身体性能を向上させようとする研究[1]、手術ロボットの鉗子に関する研究[2]などが挙げられる。本研究では、空気圧アクチュエータの中でも、非線形性の弱いエアシリンダに対する制御を扱うことにする。本研究では、チャンバと呼ばれる空気圧を入れる部屋が、2個存在する複動式エアシリンダを対象として研究を進めた。複動式エアシリンダは、空気圧を入れる部屋が2個あるが、得られる出力はシリンダロッドの往復運動であるため、2入力1出力のアクチュエータである。また、エアシリンダに入力される空気圧は、大気圧(1[atm])よりも高い圧力が使用される。さらに、オフセット圧力と呼ばれる圧力を、両チャンバに同じ圧力値を付加し、シリンダピストンに剛性を持たせて使用する。このオフセット圧力は、大気圧以上の一定圧力値として、使用されてきた圧力である。

一般的に多く使用されている制御として、PD制御やPID制御が挙げられる。これらの制御方法の利点として、早い応答性を得ることができる点、制御原理が単純な点、制御ゲインを変更した場合の出力特性を予測しやすい点、が挙げられる。しかしながら、これらの制御をエアシリンダに使用する際に、大きな問題が存在する。その問題は、制御からの入力をどのように、入力するかということである。一般的に、PD制御やPID制御は、モータなどの1入力1出力のアクチュエータに対して、使用されることが多い。エアシリンダは、大気圧以上の圧力を付加して使用する。PD制御やPID制御の出力を両方のチャンバに反映したい場合、制御からの出力を2等分する方法が考えられる。この場合、推進側チャンバに対して等分された圧力を吸気し、抵抗側チャンバに対して等分された圧力を排気する。推進側チャンバは、オフセット圧力と制御からの指令圧力が供給されるため、常に大気圧以上の圧力が供給されている。しかし、抵抗側チャンバは、制御からの指令圧力がオフセット圧力を上回ると、チャンバの圧力が大気圧を下回る供給圧力となるため、その場合は、チャンバへ供給する圧力を大気圧とする処理が行われるため、制御による指令を完全に実行することができない。例えば、オフセット圧力を2[atm]とし、制御からの指令圧力が2.5[atm]とする。推進側チャンバには、オフセット圧力の2[atm]と制御からの指令圧力2.5[atm]を2等分にした

1.25[atm]の合計 3.25[atm]が供給される。そして、抵抗側チャンバには、制御からの指令圧力 2.5[atm]を 2 等分した 1.25[atm]をオフセット圧力の 2[atm]から、減算した 0.75[atm]を計算上は供給することになる。しかし、大気圧 1[atm]以下を供給することはできないため、この場合、抵抗側チャンバに対して、1[atm]の圧力を供給することになり、本来は必要な圧力に対して 0.25[atm]の圧力が不足し、制御からの指令を完全に生かすことができない。従って、エアシリンダの制御において、制御からの指令圧力を 2 等分し、推進側チャンバには加え、抵抗側チャンバから抜くという方法は、最適な制御方法ではない。そのため、制御より計算される推進力となる指令圧力値は、推進側チャンバのみに、入力される必要がある。従って、推進力となる制御に対しては、推進側チャンバのみに指令圧力値を入力するスイッチが必要となる。

また、PID 制御は、制御に I 制御を含んでいる。この I 制御は、目標値との定常的な偏差を減らすことが可能である。しかし、ロボットアーム等が活躍する状況においては、最適な制御ではない。その理由は、ロボットアームは、動作中に目標値に向かう途中で障害物に衝突する可能性を秘めているからである。この衝突を、ロボットに対する外乱を見なすことができる。この障害物の衝突により、目標値への移動が阻害されると、I 制御において、目標値と現在値との偏差の積分値が、蓄積されてしまう。この蓄積された積分値の影響により、障害物が除去された際に、目標値と大きく行き過ぎてしまう一種の暴走が発生する。この暴走が、人の存在する空間で発生した場合には、大きな事故に繋がる可能性がある。そのため、I 制御を含む PID 制御は、ロボットアーム等が遭遇する可能性のある外乱に対して、弱いと制御である。

エアシリンダの制御に関する研究として、安定した収束性が得られる制御を用いた研究[3]、速い応答性とオーバーシュート抑制が得られる制御に関する研究[4][5]が挙げられる。安定した収束性が得られる制御を用いた研究では、制御に I-PD 制御を使用していた。I-PD 制御は、与えられた目標に対して、安定した収束性が得られる代わりに、立ち上がりなどの応答性が悪いという問題点があった。そこで、応答性を改善するために、速い応答性とオーバーシュート抑制が得られる制御に関する研究[4][5]が行われた。この研究では、I-PD 制御における応答性の遅さを改善するために、PID 制御をメインの制御として用いた。しかし、PID 制御で速い応答を得ようとすると、オーバーシュートが問題となってくる。オーバーシュートが発生する大きな原因として、エアシリンダに供給する空気圧量を調整する電磁弁の応答の遅さ、空気が持つ膨張圧縮性が挙げられる。このオーバーシュートを抑制するために、オフセット圧力の PD 制御をエアシリンダ両チャンバに同量加えることで、オーバーシュートが発生する部分において、シリンダ内の圧力を上げ、シリンダピストンを動きにくくし、オーバーシュートを抑制した。しかしながら、この研究における制御方法は、制御するために多くの空気圧を必要とする。さらに、5つの制御パラメータを設定する必要があり、大きな手間を要する。

本研究では、空気圧アクチュエータの制御において、オフセット圧力を適切に調整することにより、少ないオーバーシュート、早い応答、高い追従性を実現することを目的とする。また、オフセット圧力の調整は、単純な原理を用いて、行うことを目的とする。

第2章 空気圧アクチュエータ

2.1 三大アクチュエータ

ロボットを駆動するアクチュエータの代表として、次の3つのアクチュエータが挙げられる。モータ、油圧アクチュエータ、空気圧アクチュエータである。

2.1.1 モータ

モータは、我々の日常生活にとって、一番身近なアクチュエータである。洗濯機、冷蔵庫、エアコン等の日常生活には欠かせない電化機器、携帯電話やスマートフォンのバイブレーション、コンピュータにおける記録デバイスである HDD、ハイブリッド自動車や電気自動車のエンジンに代わる駆動源というように、幅広い分野で利用されている。

このように、モータが幅広い分野で利用されている大きな理由は、電気との相性が良い点、種類が豊富である点が挙げられる。電気は、現代社会において、簡単に手にできるエネルギーである。さらに、電気は、バッテリーに充電して、持ち運びが可能である。そのため、電気を動力源とするモータは、世の中に存在するアクチュエータ中において、最も使用しやすいアクチュエータの一つであると言える。

しかしながら、大きな出力を得たい場合、大型化が避けられない。また、モータに使用する強力な磁石には、貴重な資源であるレアアースが必要となる。我が国は、レアアースを輸入に依存している。そのため、輸入国との国交悪化等により、輸入が困難になるという大きなリスクを含んでいる。このリスクを軽減するために、レアアースを含まない磁石の研究が多くなされているが、量産化には、もう少し時間が必要である。さらに、モータをロボット等に使用する場合、減速機が必要となる。この減速機とは、歯車の集合体である。そのため、モータを使用する際、機械的に複雑となってしまう、メンテナンスが難しくなる。

2.1.2 油圧アクチュエータ

油圧アクチュエータは、大きな発生力を容易に得ることができるアクチュエータである。大きな発生力を得ることができるため、工事現場や鉱山で活躍するショベルカー等の重機におけるアームのアクチュエータとして、使用されている。

油圧アクチュエータは、その名前の通り、駆動媒体に、油を使用している。そのため、油漏れにより使用環境を汚染する可能性を秘めている。油を使用しているため、火災の可能性のある災害現場において、使用することは難しい。また、使用する油は酸化により、劣化するため、油の交換が必要である。さらに、油を蓄えておくタンク、油圧ポンプや配管等の付帯設備が必要である。

しかし、油圧アクチュエータは、出力を線形で得ることができるため、アクチュエータとして、優れた特徴を有している。そのため、ロボットハンドのアクチュエータとして、使用されている例もある。

2.1.3 空気圧アクチュエータ

空気圧アクチュエータは、駆動媒体に、空気を使用しているため、使用環境をクリーンに保つことが可能である。また、構造がとても単純であるため、機械的剛性が強く、メンテナンスも容易である。

しかし、空気圧を供給するためのエアコンプレッサが必要であり、モータと比較し、携帯性に劣る。この問題は、空気圧を蓄電池のように蓄えることができる小型の機器が、将来的に開発されると解決することが可能である。

空気圧アクチュエータは、日常生活において、あまり関係のないアクチュエータとされているが、バスや電車のドアを開閉するアクチュエータ、テーマパークのアトラクションで動いている人形のアクチュエータ、工場等の生産現場、等の多くの場面で使用されている。特に、工場等の生産現場においては、モータと比較し、多くの空気圧アクチュエータが使用されている。しかし、使用されている作業は、ラインの不良品を除去する作業、鋳打ち作業、といった単純な作業のみに使用されている。これは、空気圧アクチュエータにおいて、任意の位置にシリンダロッドを止める制御が困難なためである。原因は、空気圧アクチュエータを早く目標値に向かわせるように制御すると、空気の持つ膨張圧縮性と電磁弁の応答の遅さから、オーバシュートを発生してしまうからである。

従って、空気圧アクチュエータにおいて、早い応答で、任意の位置にシリンダロッドを止める制御が可能になると、これまでモータが行ってきた作業も空気圧アクチュエータが行えるようになる。そして、空気圧アクチュエータの利用が爆発的に増加する可能性を秘めている。

2.2 エアシリンダ

本研究では、空気圧アクチュエータの中でも代表的なエアシリンダを主な対象として、研究を進めた。

2.2.1 空気圧の単位

圧力を表す単位には、様々な種類が存在する。様々な種類があるため、単位変換の際に、異なった単位と取り間違えて変換してしまったために、事故が発生する場合もある。SI単位系においては、[Pa]、[MPa]を使用する。主にアメリカ合衆国で使用されているヤード・ポンド法においては、[psi]が使用されている。その他に、一昔前に気象分野で使用されていた[bar]等が存在する。本研究において、所属する研究室の従来研究との統一性を持たせるために、標準気圧[atm](呼び名:アトム)を単位として使用する。次の式(2.1)、式(2.2)に、[MPa]と[atm]、[bar]と[atm]との変換式を示す。

$$1 \text{ [atm]} = 0.101325 \text{ [MPa]} \quad (2.1)$$

$$1 \text{ [atm]} = 1.01325 \text{ [bar]} \quad (2.2)$$

2.2.2 エアシリンダの動作原理

エアシリンダの駆動方式には、単動式と複動式の2種類がある。単動式エアシリンダは、チャンバと呼ばれる空気圧の入る部屋が1つで、もう一方にバネを取り付けることで、ピストンを動かす仕組みになっている。本研究では、チャンバが2つ存在する複動式エアシリンダを対象に研究を進めた。複動式エアシリンダは、2つのチャンバの圧力差により、ピストンを動かす仕組みになっている。図 2.1 に、複動式エアシリンダの概念図を示す。ここで、 P_1 、 P_2 は各チャンバへの指令圧力を表す。 P_{off1} 、 P_{off2} は各チャンバへのオフセット圧力を表す。オフセット圧力とは、エアシリンダのピストンに剛性を持たせるために付加する空気圧となっている。このオフセット圧力が高いと、ピストンは動きにくくなる性質を持っている。一般的なエアシリンダの制御においては、オフセット圧力を各チャンバに値を一定として、同量の圧力を与えて制御を行う。各チャンバにおいて、吸気と排気を行い、チャンバ内の圧力を調節することにより、シリンダピストンが動作する。吸気側には、指令圧力とオフセット圧力を足し合わせた空気圧が与えられる。排気側は、スピードコントローラと呼ばれる機器に接続し、定量の排気を行う。

例えば、チャンバ1内の圧力を P_{C1} 、ピストンの断面積を A_1 とし、チャンバ2内の圧力を P_{C2} 、ピストンの断面積を A_2 とする。その時の発生力を F とすると式(2.3)で表すことができる。

$$F = P_{C1}A_1 - P_{C2}A_2 \quad (2.3)$$

チャンバ2の圧力がチャンバ1と比較して高い場合の $P_{C2} < P_{C1}$ かつ、チャンバ2のピストン断面積が大きい場合の $A_2 < A_1$ ならば、ピストンはチャンバ2の方向へと移動することになる。

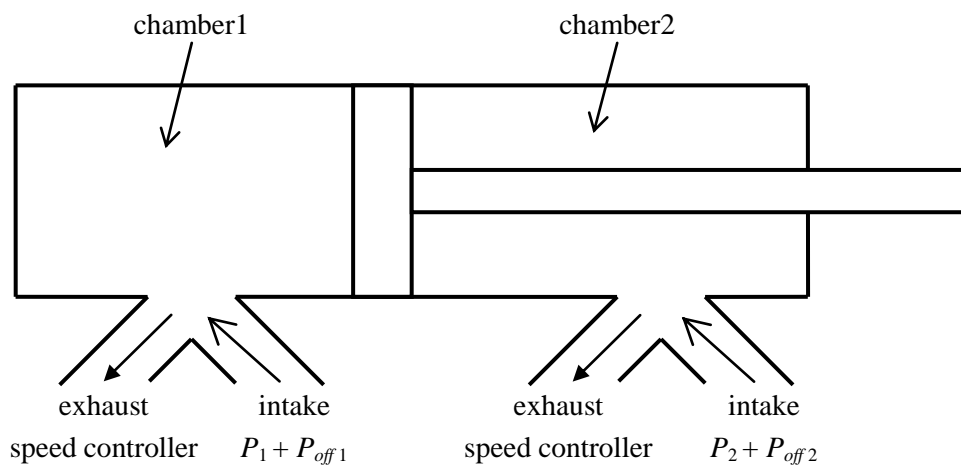


図 2.1 複動式エアシリンダ概念図

2.2.3 オフセット圧力

オフセット圧力と呼ばれる圧力は、本研究において、大変な重要な圧力である。オフセット圧力とは、エアシリンダのピストンに、剛性を与える圧力である。また、与えるオフセット圧力を変化させることにより、エアシリンダのピストンに与える剛性を調節することが可能である。また、オフセット圧力を両チャンバに同じ圧力を付加している場合、オフセット圧力とエアシリンダのピストンが与えられる剛性は、等しい関係にある。また、各チャンバにおいて、別々のオフセット圧力を付加した場合、エアシリンダのピストンの剛性は変化するが、オフセット圧力の変化が、剛性の変化と等しい関係にはない。エアシリンダの両チャンバに、大気圧に近いオフセット圧力を付加している場合、ピストンを押し込もうとする外力を加えると、ピストンを容易に押し込むことができる。また、高いオフセット圧力を付加している場合、ピストンを押し込もうとする外力を加えても、ピストンを容易に押し込むことが難しい。このオフセット圧力をバネに例えると、オフセット圧力がバネの硬さを決めるパラメータとなる。従って、低いオフセット圧力は変形が容易な柔らかいバネ、高いオフセット圧力は変形しにくい硬いバネ、を表す。

これまでのエアシリンダの制御においては、このオフセット圧力を一定値として、使用してきた。本研究では、このオフセット圧力を積極的に制御することで、制御性能の向上を目指す。

2.3 空気圧アクチュエータの制御に対する従来研究

本研究と同様に、オフセット圧力(従来研究においては、バイアス圧力と呼称)を制御することにより、制御性能を向上させようとする従来研究[4][5]が存在する。

この従来研究は、両チャンバのバイアス圧力を上げ下げし、剛性を変化させることで、制御性能の向上を目指した研究である。オーバシュートの発生を抑えるために、その発生直前に、バイアス圧力を大きく上げることにより、ピストンに高い剛性を与えることで、ブレーキを掛ける原理を使用している。このバイアス圧力制御を、PID 制御で制御された系に対し付加して使用している。従来研究における制御数式は、式(2.4)、式(2.5)のように表すことができる。

$$P_{bias}(t) = P_0 + \left\{ K_1 (x_{tg} - x) + K_2 \frac{dx}{dt} \right\} \quad (2.4)$$

$$P_{PID}(t) = K_p e + K_i \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (2.5)$$

ここで、 $P_{bias}(t)$ はバイアス圧力制御による操作量、 P_0 は基本バイアス圧力、 K_1 、 K_2 、 K_p 、 K_i 、 K_D は制御ゲイン係数、 x_{tg} は目標値、 x は現在値、 $P_{PID}(t)$ はPID 制御による操作量、 e は目標値と現在値との偏差、である。

また、オーバシュートを抑制する場合における推進側チャンバと抵抗側チャンバの指令圧力値の内容を表した図が、図 2.2 である。この従来研究における制御は、PID 制御の 3 個の制御ゲイン、バイアス圧力制御の 2 個の制御ゲインを合わせた 5 個の制御ゲインを決定する必要があり、制御ゲインを決定する手間が必要である。さらに、剛性を高くすることによりオーバシュートを抑制するため、高い圧力の空気圧が必要となる。

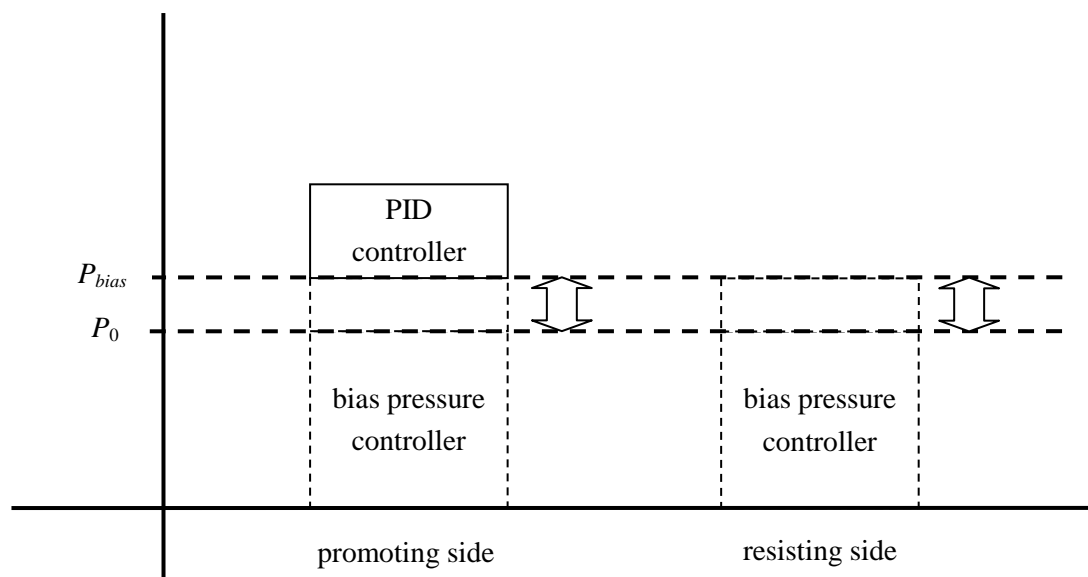


図 2.2 オーバシュート抑制時における各チャンバの指令圧力

第3章 システム構成

3.1 制御対象のモデル化

本研究では、エアシリンダをアクチュエータとしたロボットアームを実験に使用した。本研究で使用したロボットアームは、7自由度を有している。本研究では、7自由度での制御を行うにあたり、ラグランジュ法に基づいて運動方程式を導出した。しかし、7自由度の運動方程式は、導出の大変なこともさながら、とても大きな式となり、扱うことが難しい。そこで、本研究では、手首2自由と肘の回旋は他の関節へ及ぼす影響が少ないだろうと考え、それら3自由度を除いた計4自由度の運動方程式の導出を行った。各関節の運動方程式は、式(3.1)のように表させる[3].

$$J\ddot{\theta}(t) + D\dot{\theta}(t) + h(\ddot{\theta}(t), \dot{\theta}(t)) + g(\theta(t)) = \tau(t) \quad (3.1)$$

ここで、 J は慣性モーメント、 D は粘性摩擦係数、 h は非線形項、 g は重力項、 τ はトルク、である。

PID制御などを行うには、運動方程式が線形である必要があるため、線形近似を行わなくてはならない。そこで、本研究では、非線形補償と重力補償を行うことで、運動方程式を線形近似することとし、式(3.2)、式(3.3)のように線形近似した。

$$J\ddot{\theta}(t) + D\dot{\theta}(t) = \tau'(t) \quad (3.2)$$

$$\tau'(t) = h(\ddot{\theta}(t), \dot{\theta}(t)) + g(\theta(t)) + \tau(t) \quad (3.3)$$

ここで、 J は慣性モーメント、 D は粘性摩擦係数、 θ はロボット関節角度、 h は非線形項、 g は重力項、 τ はトルク、である。

3.2 P 制御

本研究では，ロボットアームをメインに駆動させる制御として，一般的に良く用いられている P 制御を使用することにした．P 制御は，オーバシュートを生じやすいが，立ち上がり時間などの応答性に関して，早い結果が得られる．また，P 制御の一般的な認知度と，制御ゲインパラメータを変化させた時の出力結果の挙動が，予測し易いという点からも採用することにした．本研究における，P 制御の位置付けは，自動車におけるアクセルに相当する．そのため，P 制御が入られるチャンバは，推進側のチャンバのみとなる．P 制御における制御則は，式(3.4)のように表すことができる．

$$u_p(t) = k_p e(t) \quad (3.4)$$

ここで， $u_p(t)$ は操作量， $e(t)$ は偏差， k_p は比例制御ゲイン，である．

3.3 オフセット圧力の制御

一般的に、エアシリンダの制御において、オフセット圧力は一定で用いられている。また、オフセット圧力を制御した場合は、両チャンバ共通で制御されてきた。一定値や両チャンバ共通で制御されてきた理由として、両チャンバに同じ圧力を付加した場合、発生力が変化しないためである。

しかし、筆者は、過渡状態において、制御性能の向上に寄与するのであれば、両チャンバのオフセット圧力を個別に変化させることで、発生力が変化することは、力制御を行なわない場合には問題にならないと考えた。推進側になるチャンバの圧力が高く、抵抗側になるチャンバの圧力が低くなると、エアシリンダ内のピストンが動きやすくなり、制御性能が向上するのではないかと考えた。このまま、推進側のチャンバの圧力を高くし、抵抗側のチャンバの圧力を低くすると、オーバシュートが問題となってくる。そのため、オーバシュートが発生する直前から、推進側と抵抗側のチャンバの圧力を逆転させることで、オーバシュートを発生する力に対して、抑制力を発生させる必要がある。オーバシュートを抑制した後は、オーバシュート抑制時に、逆転させていた圧力を元に戻すことのできる制御が必要であると考えた。

制御要素数が多くなると、パラメータ設定の手間が煩雑になってくるため、制御要素数はなるべく少ない方が好ましいと考えられる。そのため、P 制御において、1 つのパラメータ設定を行なう必要があり、オフセット圧力を制御する制御要素数は、1 要素もしくは 2 要素程度で制御を行なうことが適切と考えられる。制御要素数は、より少ない方が好ましいので、本研究では、オフセット圧力は 1 要素で制御することにした。

オフセット圧力を制御することで、推進側と抵抗側のチャンバの圧力を反転させ、オーバシュートを抑制することを目指すので、オーバシュート発生直前に、大きく変化する要素が必要となる。比例要素、積分要素ともに、目標値と現在値の偏差が減少してくるため、オーバシュート発生直前には大きな変化は発生しない。微分要素は、未来の変化を見るために使用されるので、オーバシュート発生前に変化のピークが発生すると予測される。目標値を 30[deg] のステップ入力で与えた時の角度変化を図 3.1 に示す。また、その時における図 3.2 に比例要素の変化を、図 3.3 に積分要素の変化を、速度変化を図 3.4 に示す。図 3.4 から、速度の変化は、オーバシュート発生前に変化のピークを発生していることが確認できる。そのため、オフセット圧力は微分要素(D 制御)を用いて制御することにする。オフセット圧力の制御則は、式(3.5)、式(3.6)、で表すことができる。また、図 3.5 と図 3.6 に、指令圧力の模式図を示す。

$$u_{off1}(t) = off_0 + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

$$u_{off2}(t) = off_0 - K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6)$$

ここで、 $u_{off1}(t)$ 、 $u_{off2}(t)$ は操作量、 $e(t)$ は偏差、 off_0 は基本オフセット圧力(2[atm])、 K_D は微分制御ゲイン、である。また、角度が正の方向に増加する場合に、推進側になるエアシリンダチャンバに $u_{off1}(t)$ を、抵抗側になるエアシリンダチャンバに $u_{off2}(t)$ を入力することになる。

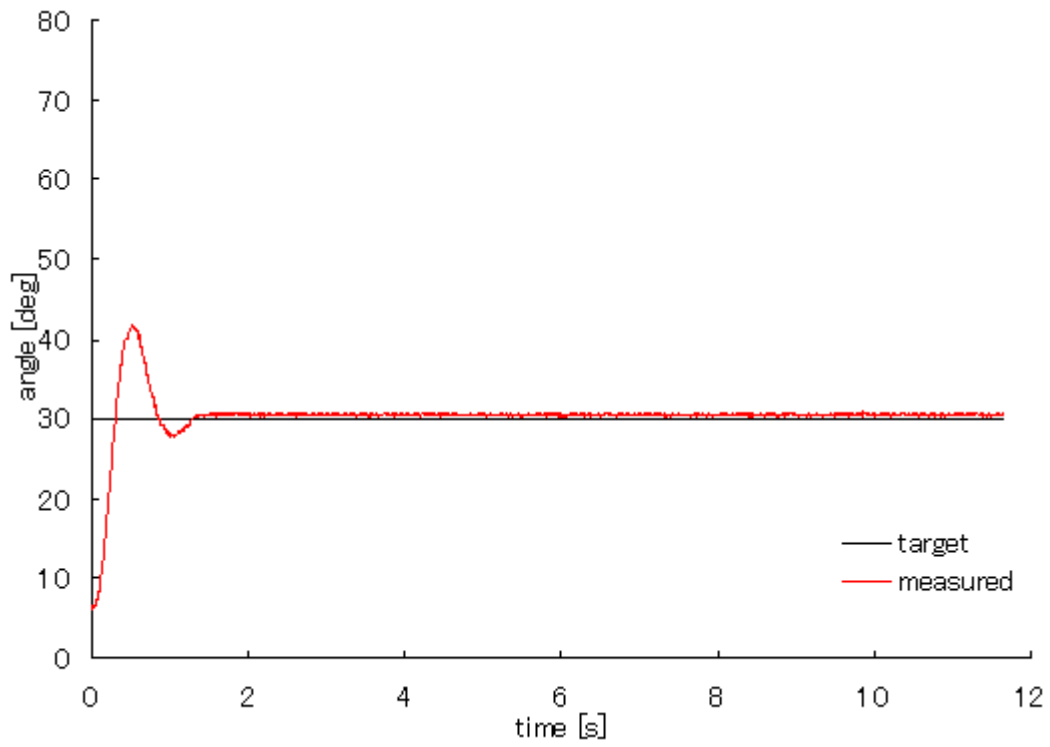


図 3.1 P 制御における目標値 30[deg]の角度変化

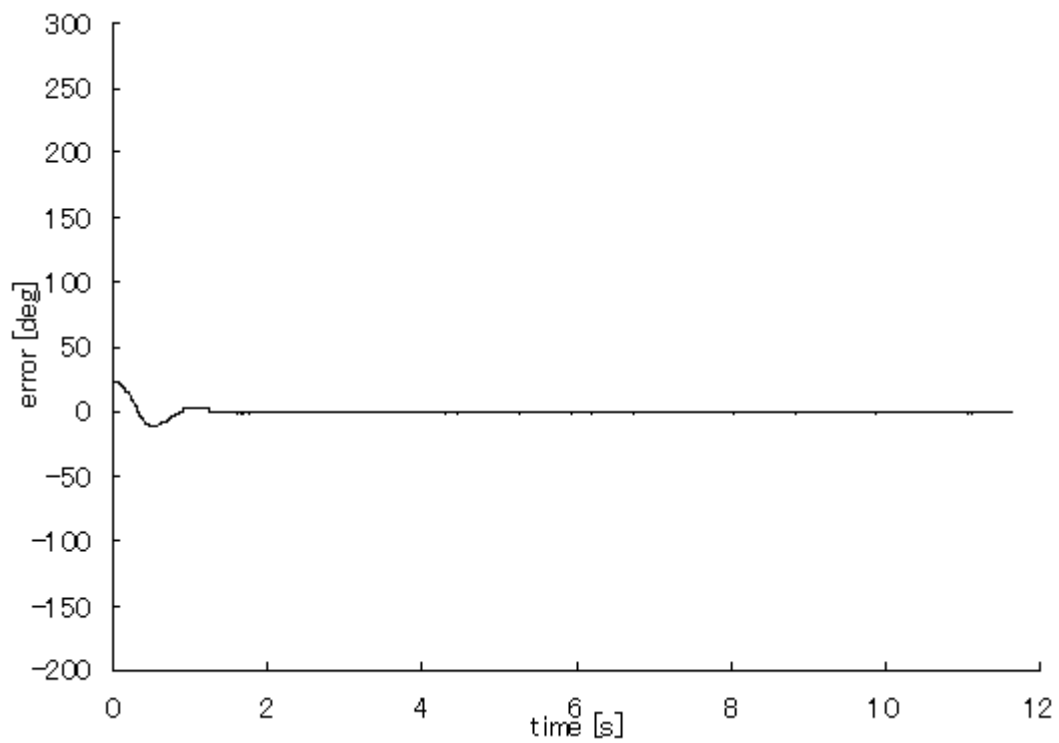


図 3.2 P 制御における目標値 30[deg]の偏差変化

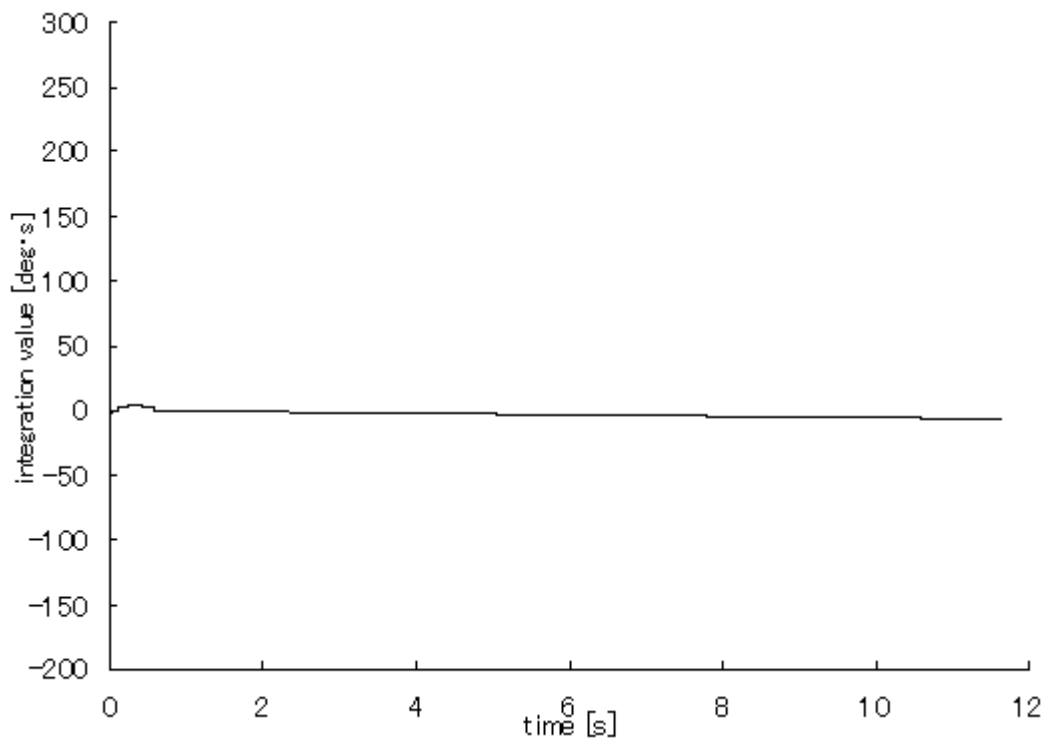


図 3.3 P 制御における目標値 30[deg]の積分値変化

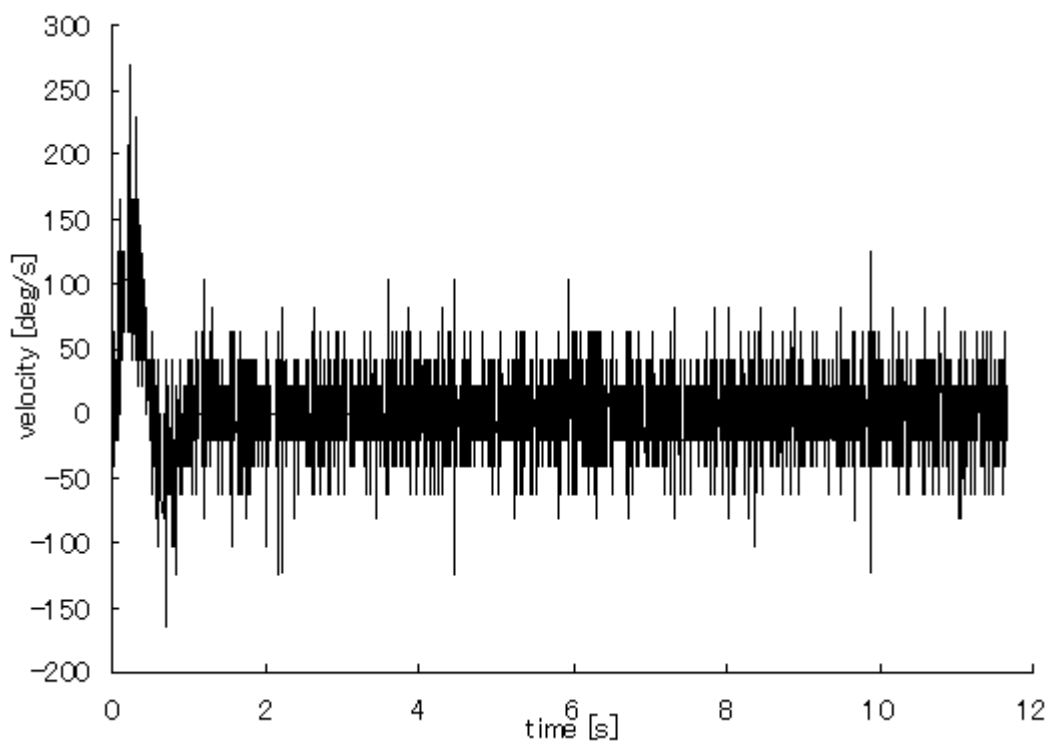


図 3.4 P 制御における目標値 30[deg]の速度変化

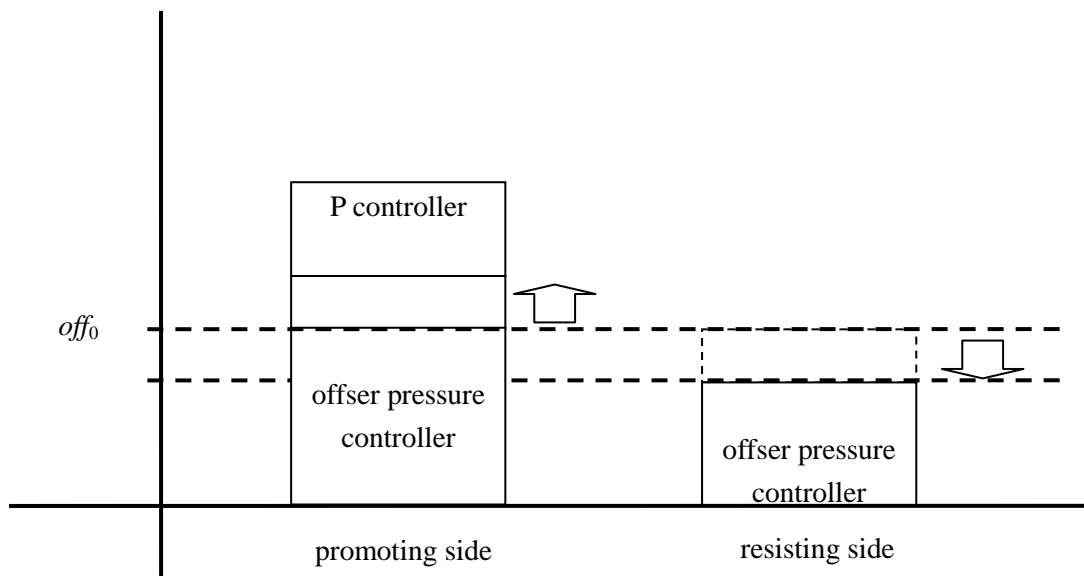


図 3.5 非オーバーシュート抑制時における各チャンバの指令圧力

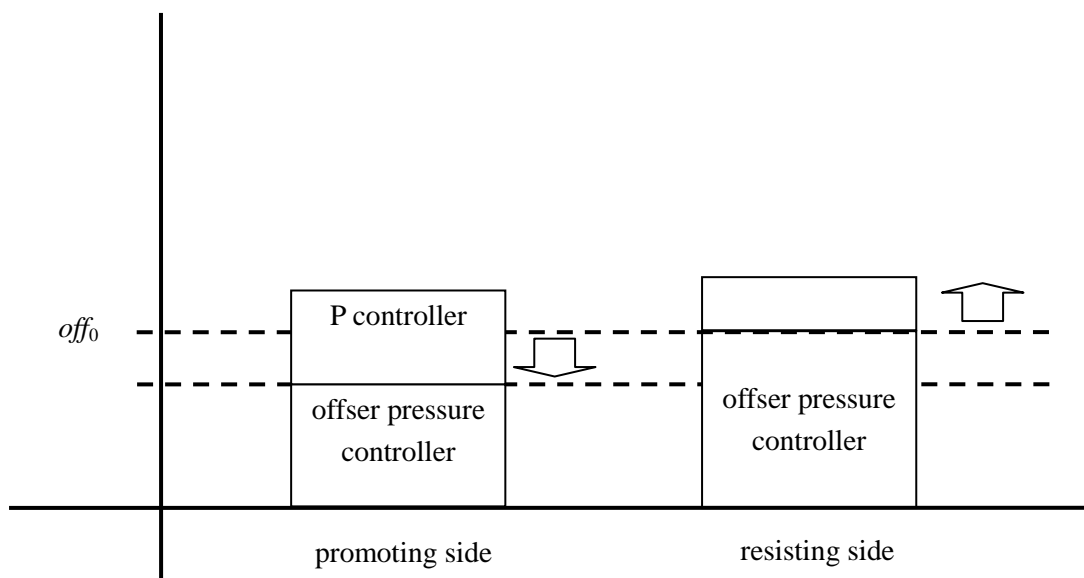


図 3.6 オーバーシュート抑制時における各チャンバの指令圧力

3.4 システム全体の制御

本研究で使用したエアシリンダは、複動式エアシリンダである。複動式エアシリンダは、チャンバと呼ばれる空気圧を印加する部屋が2個ある。そのため、エアシリンダ1個のシステム全体においては、式が2個存在することになる。システム全体の制御則は、P制御とオフセット圧力制御からの出力の2つを足し合わせたものを制御対象へ入力し、制御を行なう。しかし、P制御の出力は、推進側になるチャンバへのみ入力される仕組みになっている。そのため、制御則は式(3.7), (3.8)のようになる。

$$u_1(t) = \alpha u_p(t) + u_{off1}(t) \tag{3.7}$$

$$u_2(t) = \beta u_p(t) + u_{off2}(t) \tag{3.8}$$

ここで、 $u_1(t)$, $u_2(t)$ は各チャンバへの操作量、 $u_p(t)$ はP制御による操作量、 $u_{off1}(t)$, $u_{off2}(t)$ はオフセット圧力制御による操作量、 α , β はP制御切り替え係数である。 $\alpha = 1$ ならば $\beta = 0$, $\alpha = 0$ ならば $\beta = -1$ となる。 α は、 $u_1(t)$ が入力されるチャンバが推進側の時 $\alpha = 1$, 抵抗側の時 $\alpha = 0$ となる。ロボットアーム肩屈伸関節シリンダのシリンダロッドがあるチャンバ側のブロック線図が、図3.7となる。このブロック線図において、 NL は非線形補償と重力補償、 $P(s)$ はエアシリンダのチャンバである。

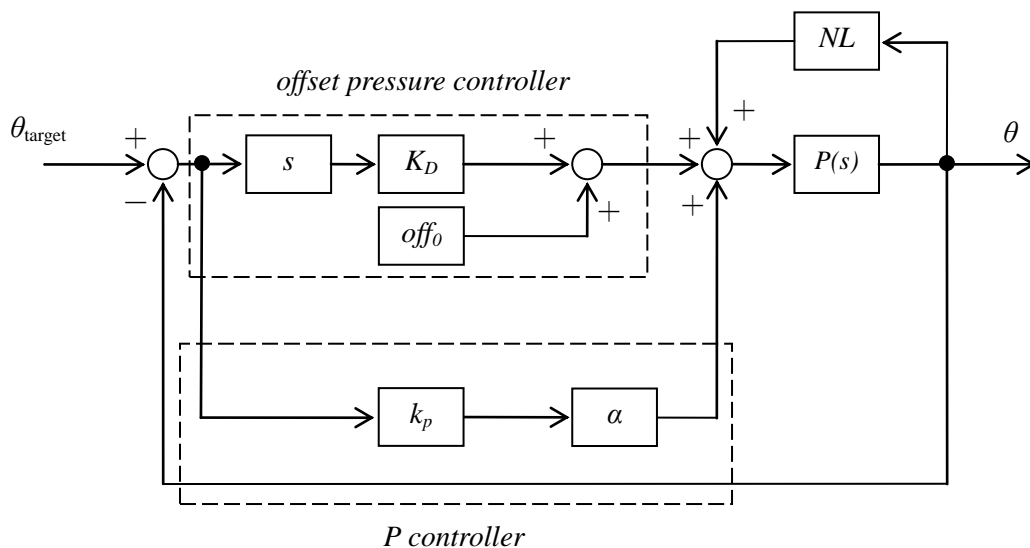


図 3.7 肩屈伸関節におけるシリンダロッド側チャンバのブロック線図

第4章 オフセット圧力制御の制御ゲイン

4.1 制御ゲインの決定方法

本研究では、オフセット圧力制御における制御ゲインは、次のように決定した。

- (1) オフセット圧力 off_0 を一定(2[atm])とし、P 制御において、オーバシュートが 20～30[%]の出力結果が得られるように、P 制御の制御ゲインを調節する。
- (2) オフセット圧力制御の制御ゲイン K_D を 0.01 として、制御結果を得る。
- (3) 一つ前のオフセット圧力制御の制御ゲイン K_D に 0.01 加え、制御結果を得る。
- (4) 制御結果のオーバシュートが目的とする値になるまで、(3)の操作を繰り返す。

P 制御のみでオーバシュートが発生している制御例が、図 4.1 である。また、この時における発生力の変化が図 4.2 である。P 制御のみの制御例に、上記の方法を用いて制御ゲインを決定したオフセット圧力制御を付加した。その結果が、図 4.3 となる。P 制御のみの場合には発生していたオーバシュートが、オフセット圧力制御を付加することにより、抑制されている。また、その時における発生力の変化が図 4.4 となる。P 制御のみの場合は、どちらか片方のチャンバの指令圧力しか変化しない。しかし、オフセット圧力制御が追加された制御においては、抵抗側チャンバのオフセット圧力が上昇し、推進側のオフセット圧力が低下するため、オーバシュートを発生する前に、推進力と逆方向の発生力が発生することで、オーバシュートを適切に抑制できている。

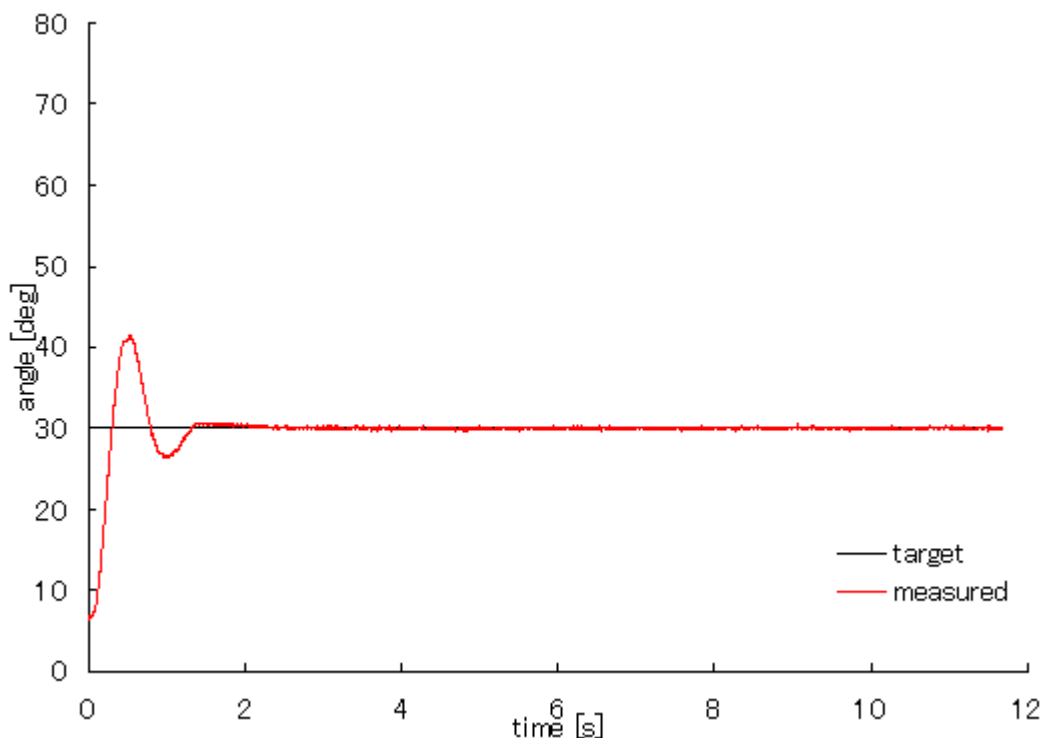


図 4.1 P 制御のみににおける角度変化

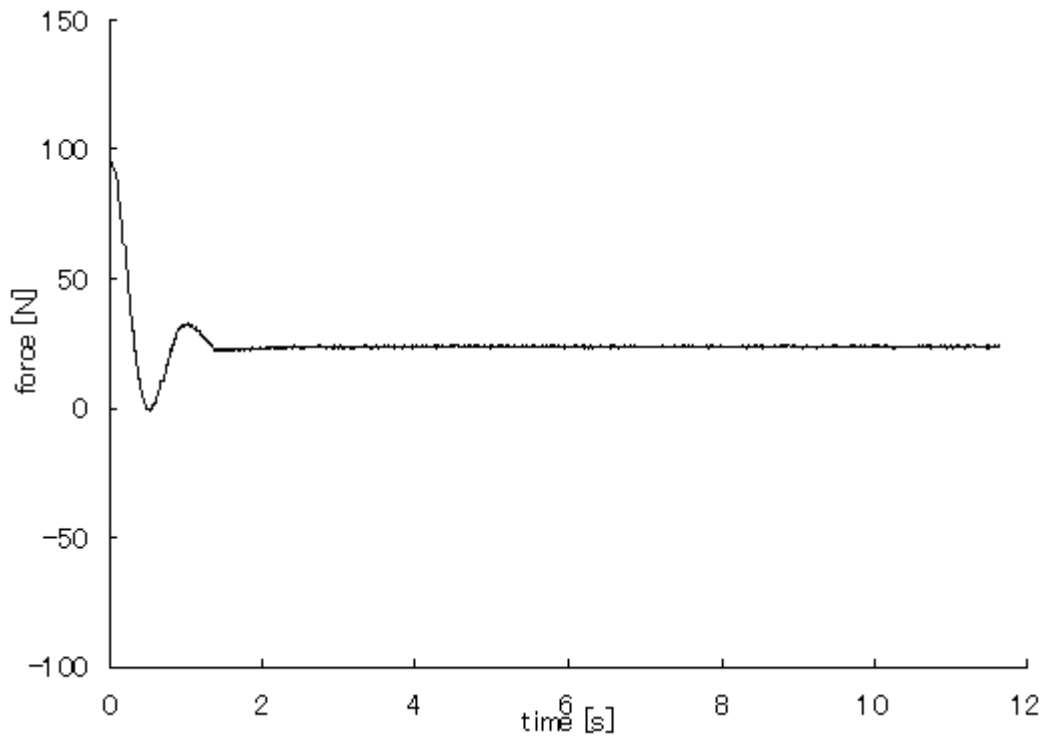


図 4.2 P制御のみにおける発生力変化

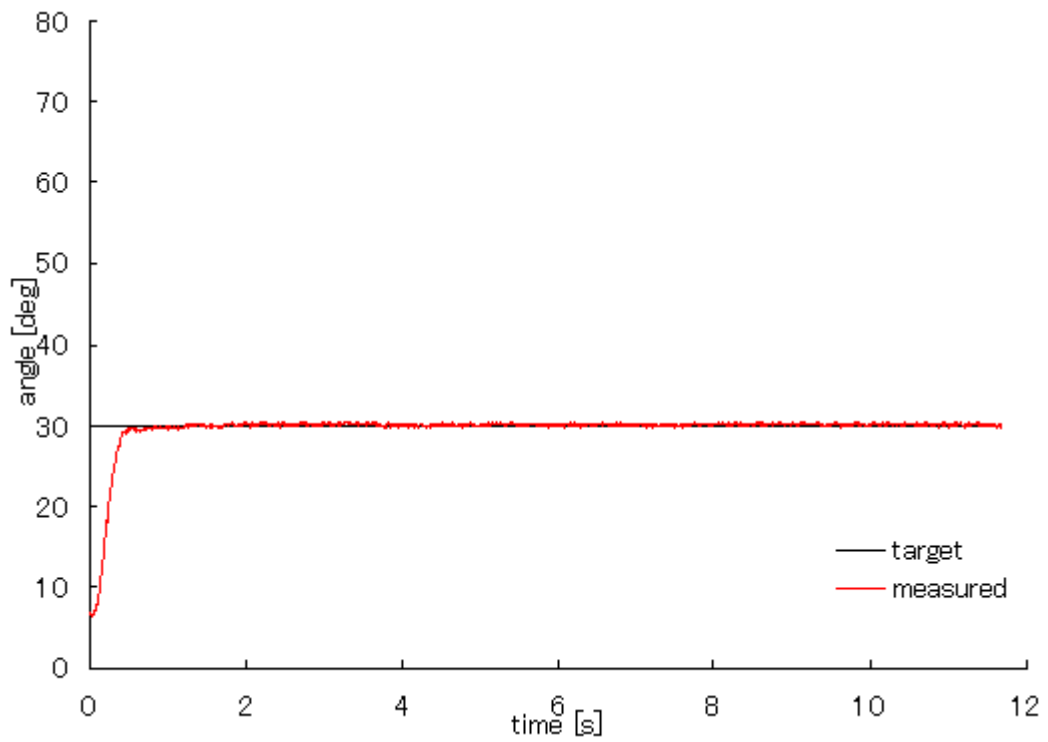


図 4.3 P+オフセット圧力制御における角度変化

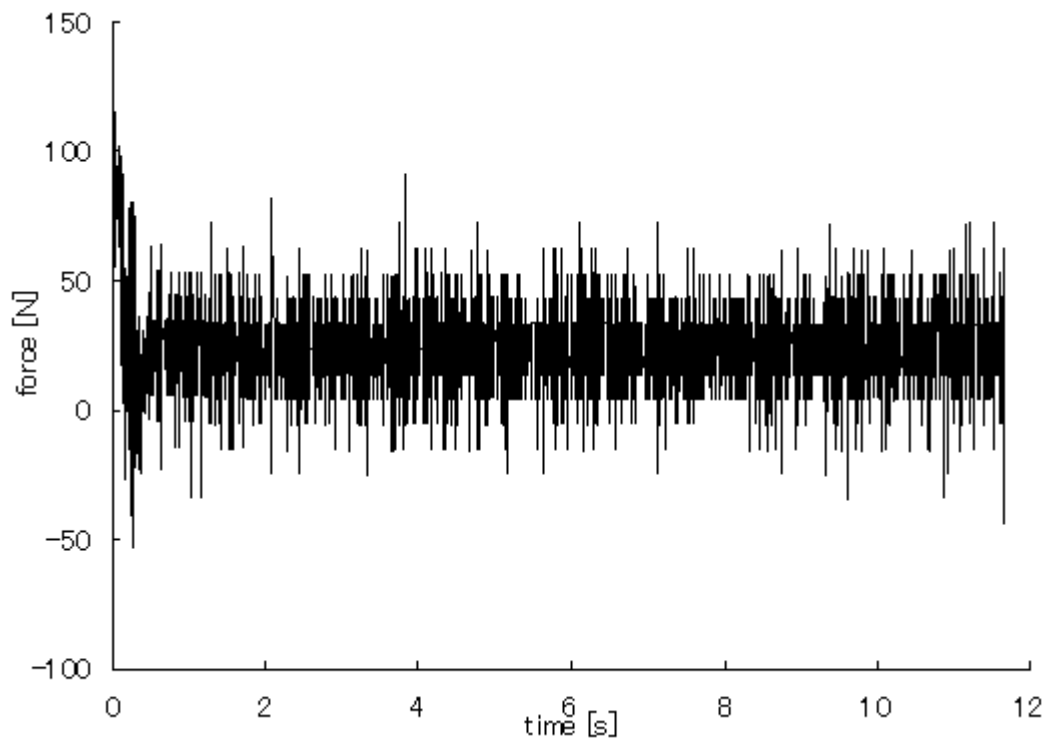


図 4.4 P+オフセット圧力制御における発生力変化

4.2 制御ゲインの数値変化による制御への影響

オフセット圧力制御において、制御ゲインが適正值よりも小さい場合には、P 制御におけるオーバーシュートが抑制することができない。また、制御ゲインが適正值よりも大きい場合には、P 制御におけるオーバーシュートは抑制できるが、立ち上がりなどの応答性に関する性能が低下してしまう。

オフセット圧力制御のゲインを変化させた場合の結果を図 4.5 から図 4.8 に示す。制御結果の目標値をオーバーシュート 5[%]、収束時間 0.8[s]とする。また、オフセット圧力制御の適正なゲインを使用した結果は、図 4.7 とする。オフセット圧力制御の制御ゲインは、適正值を 100[%]とすると、その適正值から±10[%]の範囲内にあると、目標値を満たす。

そのため、オフセット圧力制御における制御ゲインは、厳密に設定しなくとも、所望の制御結果が得られる。

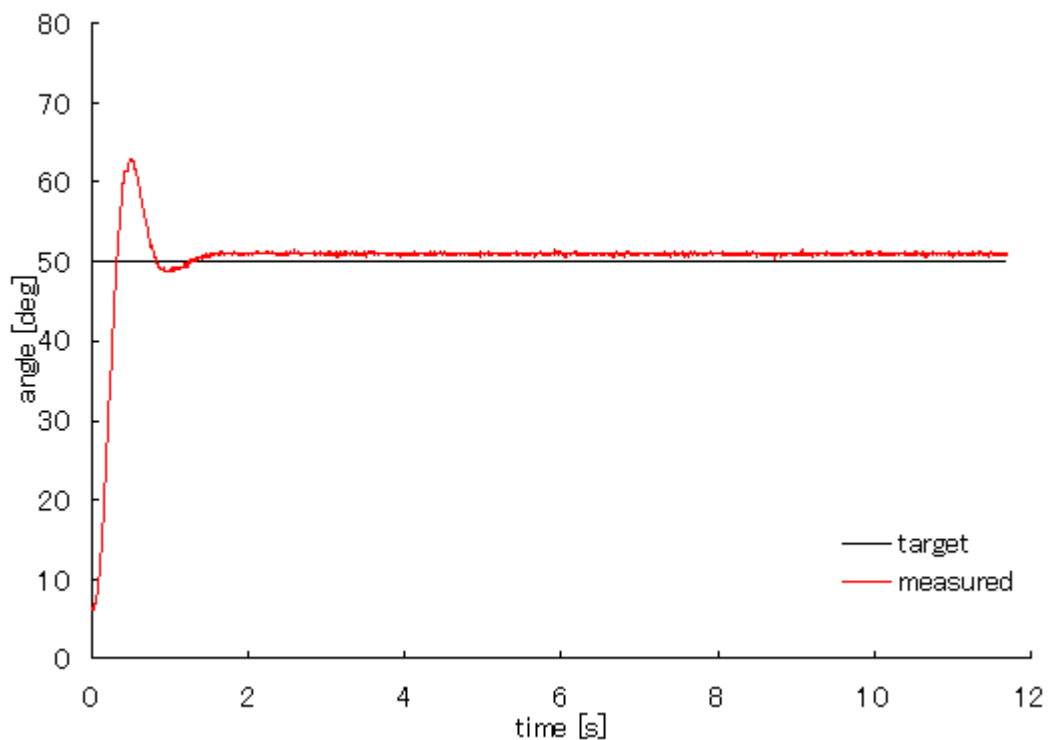


図 4.5 オフセット圧力制御ゲイン適正值の 0[%]における角度変化

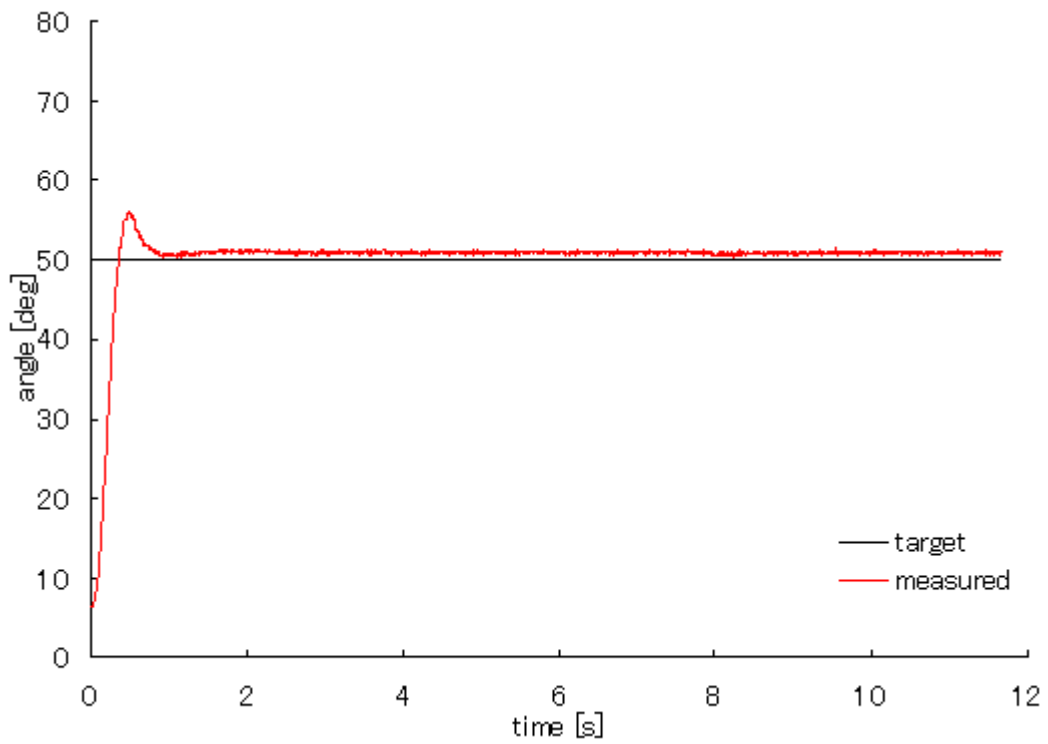


図 4.6 オフセット圧力制御ゲイン適正值の 50[%]における角度変化

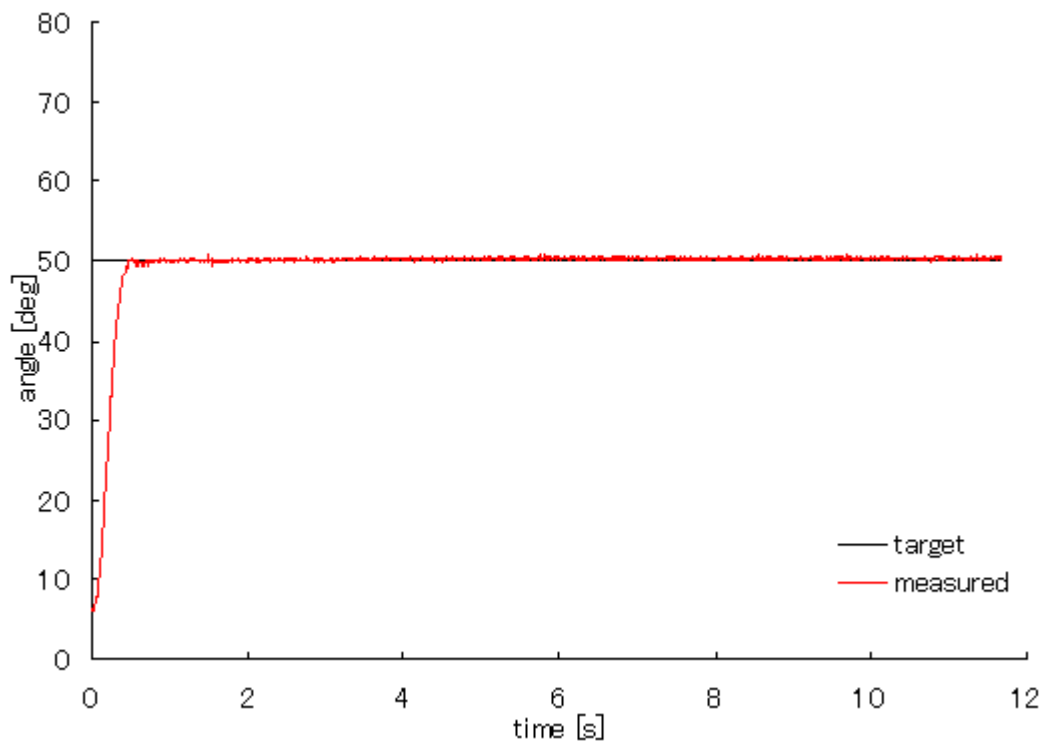


図 4.7 オフセット圧力制御ゲイン適正值の 100[%]における角度変化

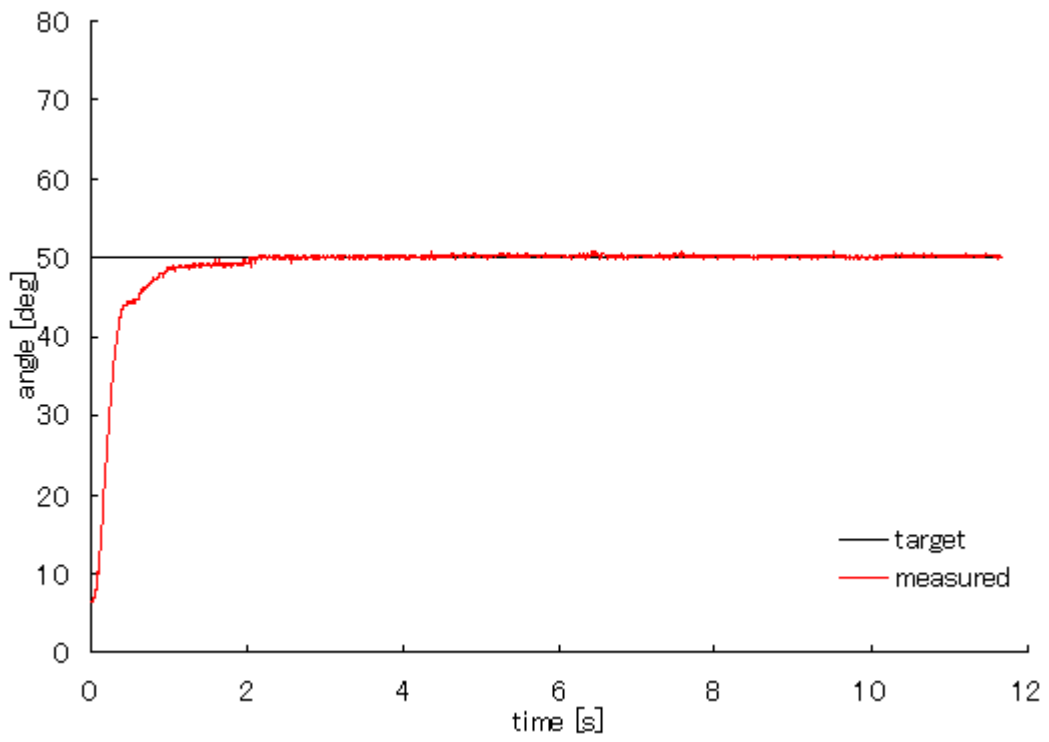


図 4.8 オフセット圧力制御ゲイン適正值の 150[%]における角度変化

第5章 オフセット圧力と制御ゲイン

5.1 基本オフセット圧力と制御ゲインとの関係

本研究において、基本オフセット圧力は、2[atm]を使用した。使用環境するにおいては、高いオフセット圧力を使用する場合も考えられる。基本オフセット圧力を 1.0[atm]から 4.0[atm]までの間を 0.1[atm]の刻みで変化させた場合における出力の変化を図 5.2 から図 5.32 に示す。また、P 制御、オフセット圧力制御の制御ゲインは、同じ値の制御ゲインを使用している。制御ゲインを設定した際の出力は、図 5.1 のような出力である。

1.0[atm]から 3.6[atm]までの基本オフセット圧力においては、同レベルの制御性能が得られている。しかし、3.7[atm]から 4.0[atm]までの基本オフセット圧力における出力は、1.0[atm]から 3.6[atm]までの基本オフセット圧力における出力より劣る結果となった。この原因として、使用しているエアコンプレッサの性能により、基本オフセット圧力をシリンダに対して安定的に供給することができなかつたためであると考えられる。本研究の制御は、基本オフセット圧力を変化させても、制御ゲインを変更することなく、同じ制御ゲインで使用する事が可能である。

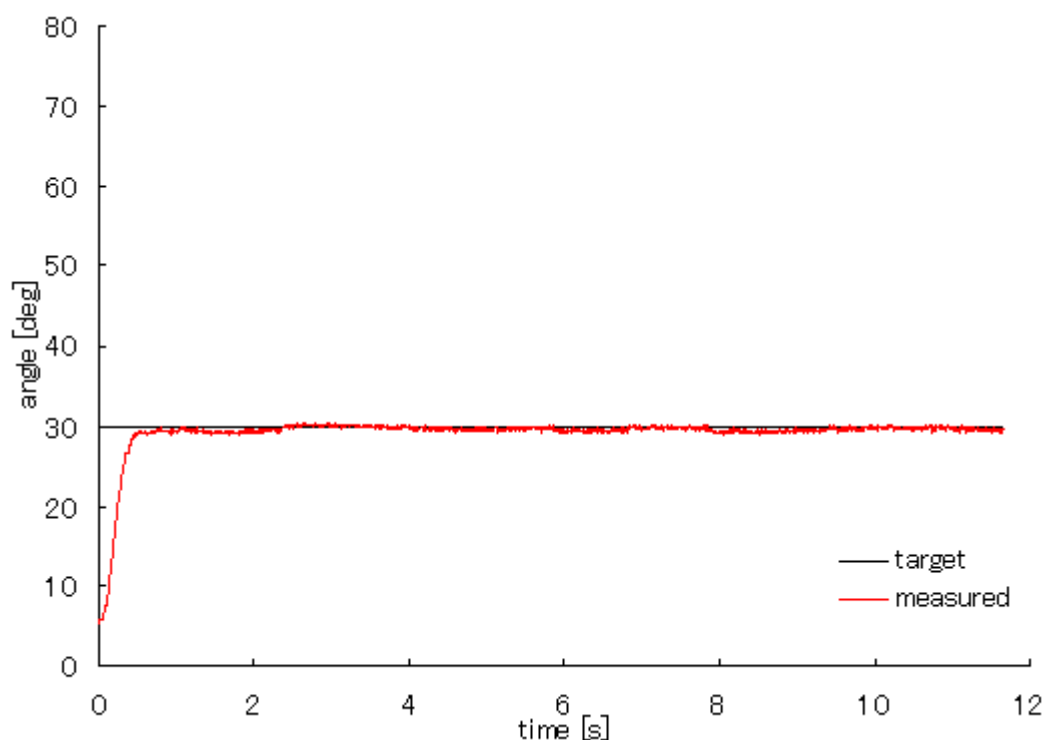


図 5.1 ゲイン設定時の角度変化 (基本オフセット圧力 2.0[atm])

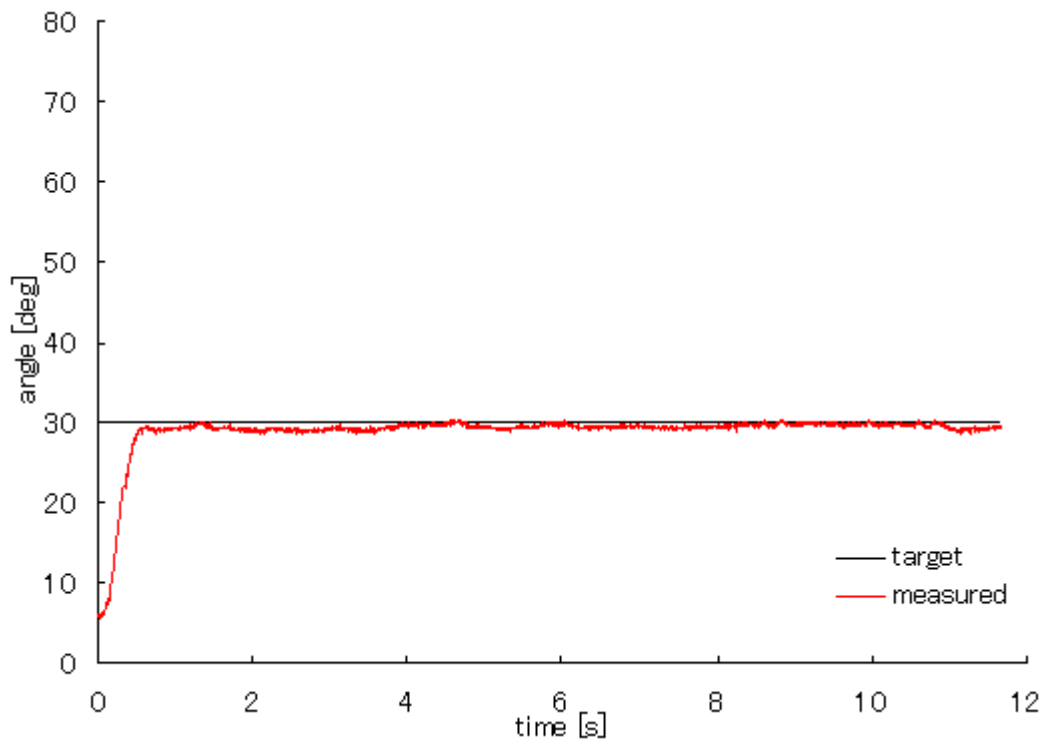


図 5.2 基本オフセット圧力 1.0[atm]時の角度変化

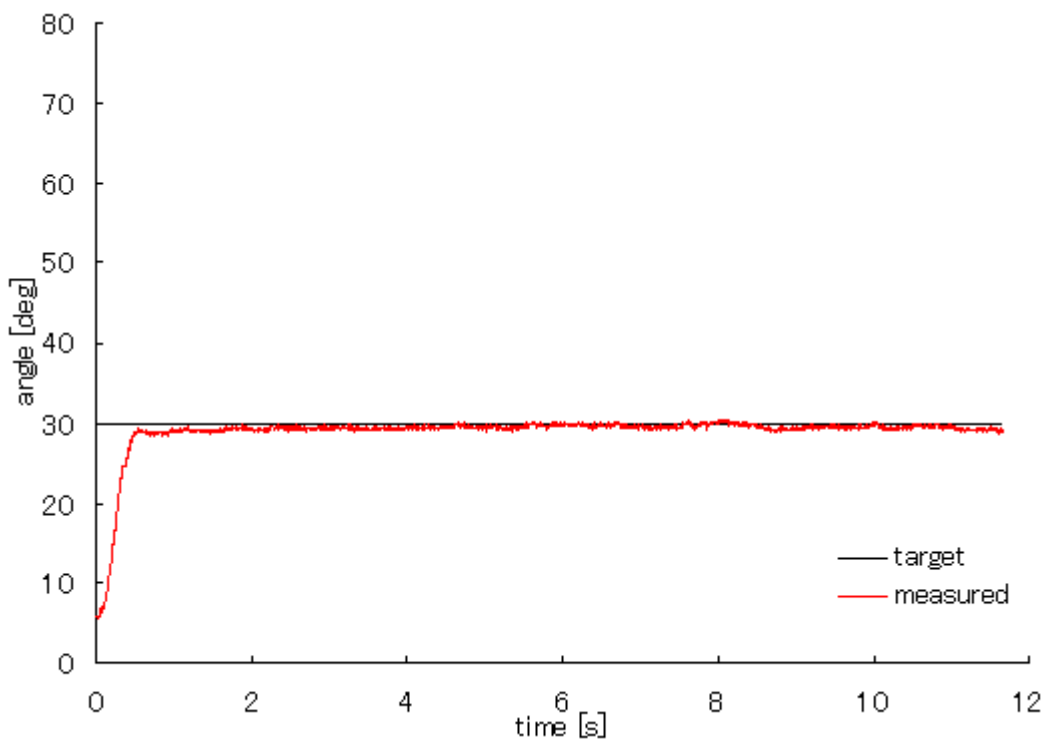


図 5.3 基本オフセット圧力 1.1[atm]時の角度変化

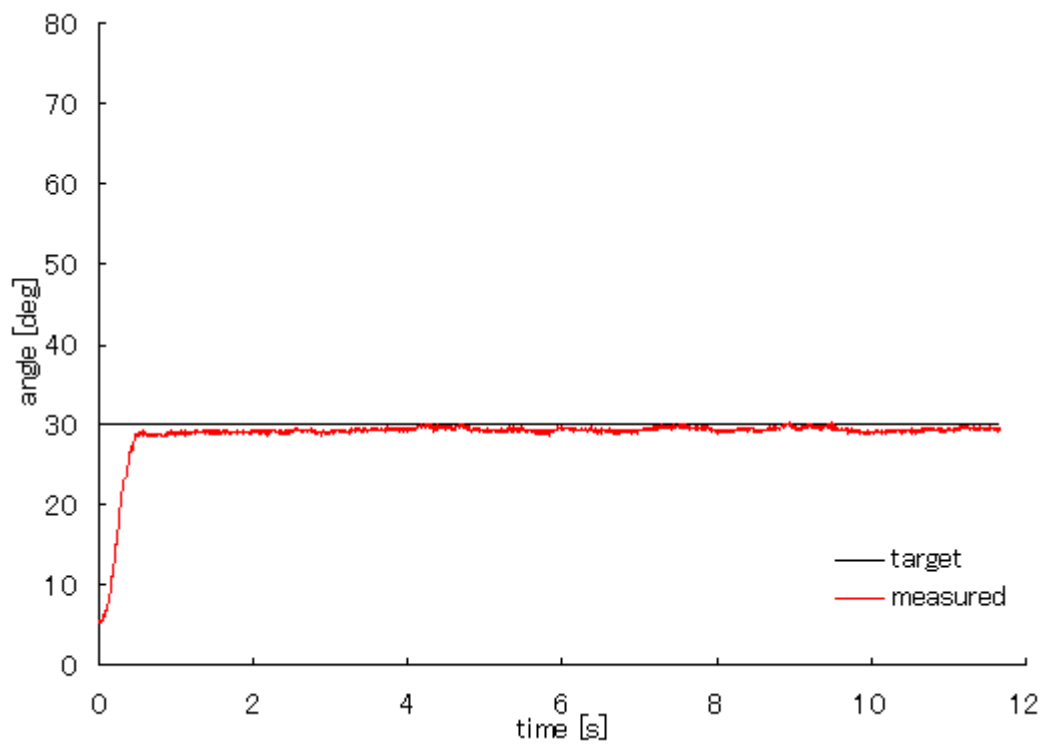


図 5.4 基本オフセット圧力 1.2[atm]時の角度変化

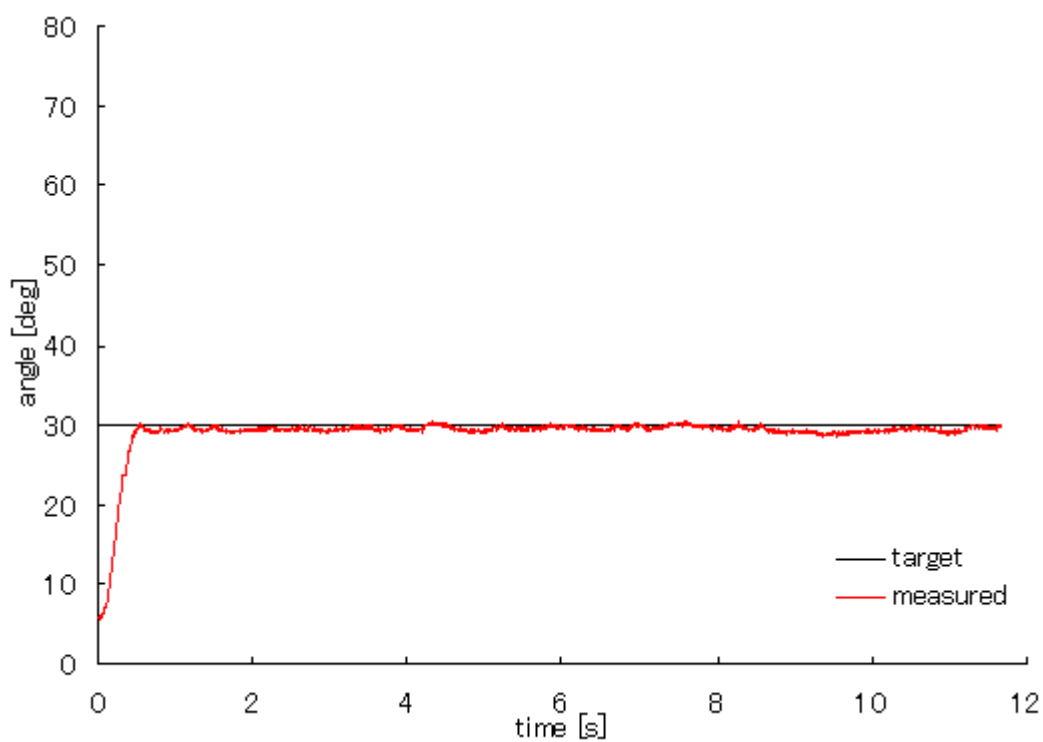


図 5.5 基本オフセット圧力 1.3[atm]時の角度変化

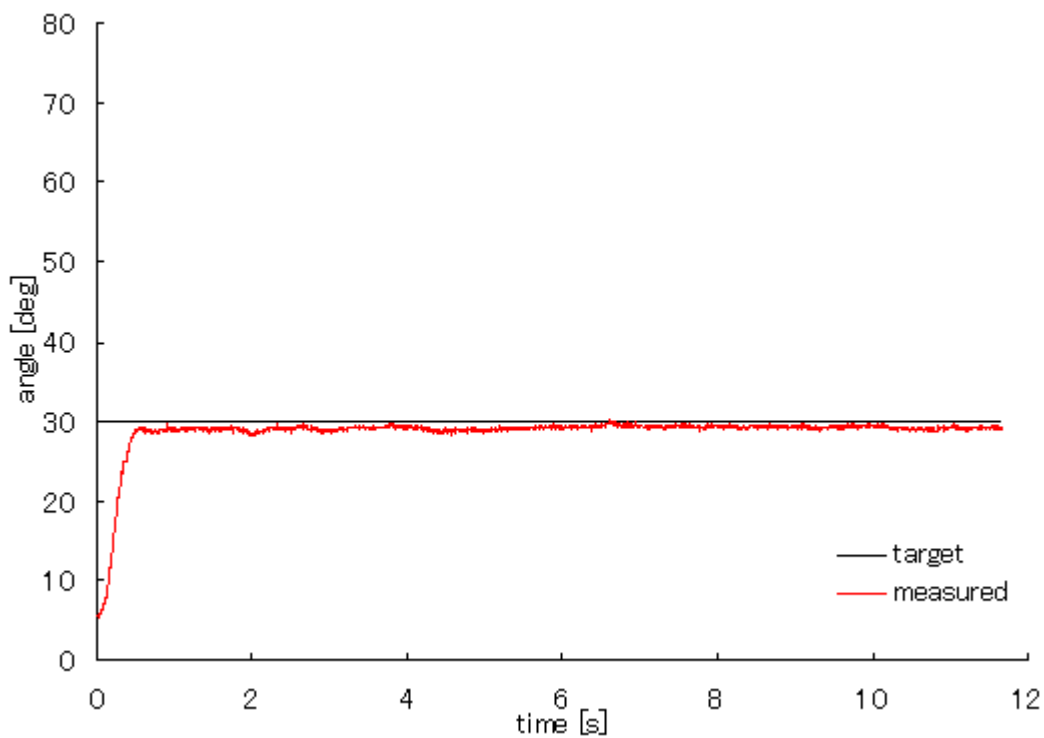


図 5.6 基本オフセット圧力 1.4[atm]時の角度変化

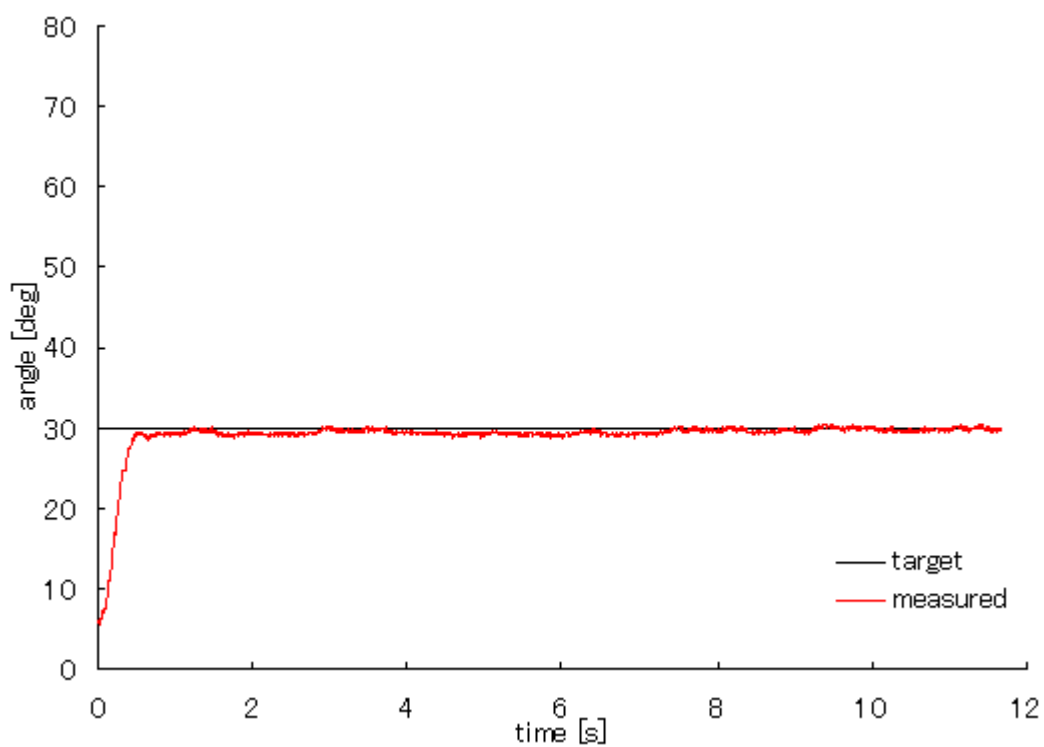


図 5.7 基本オフセット圧力 1.5[atm]時の角度変化

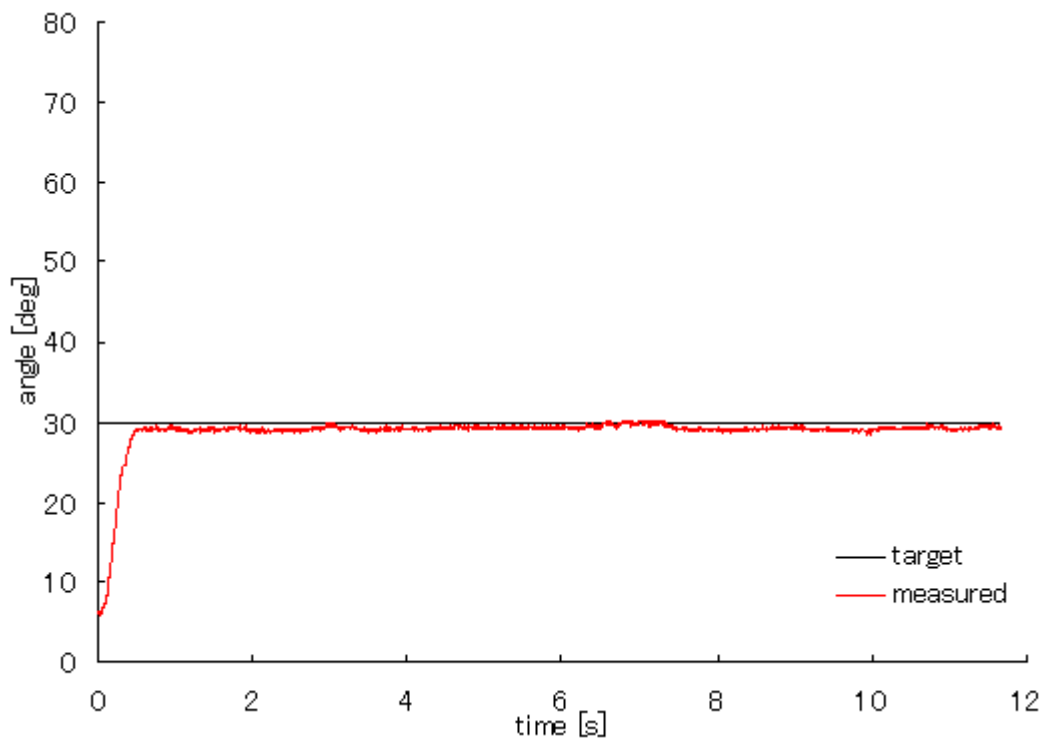


図 5.8 基本オフセット圧力 1.6[atm]時の角度変化

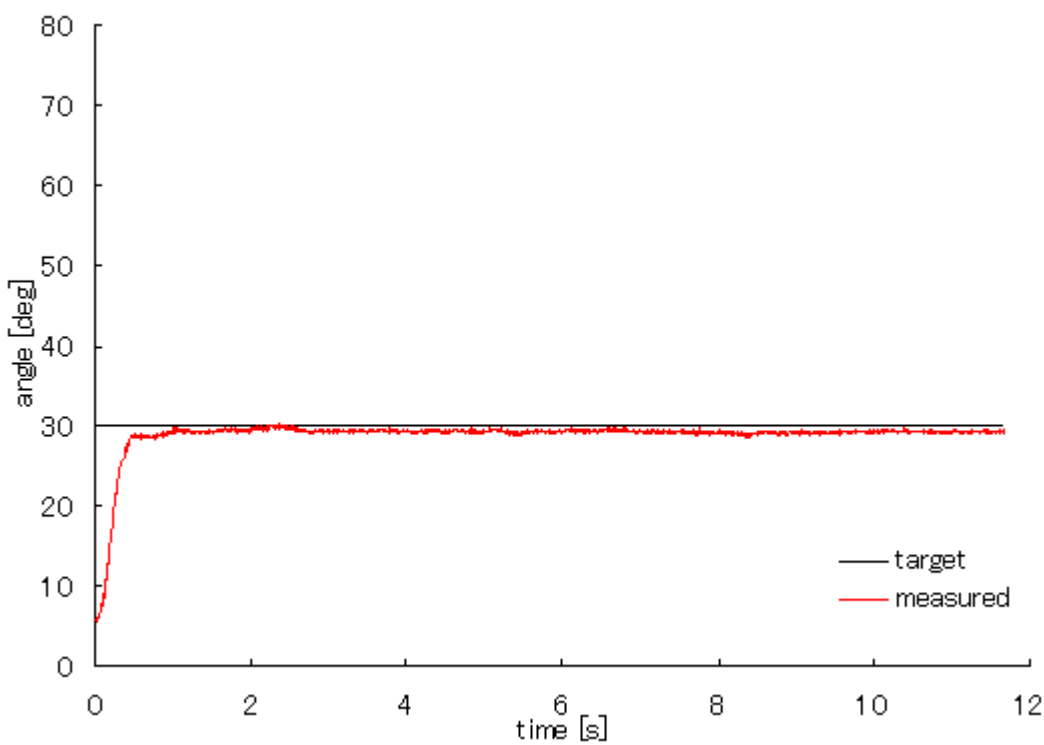


図 5.9 基本オフセット圧力 1.7[atm]時の角度変化

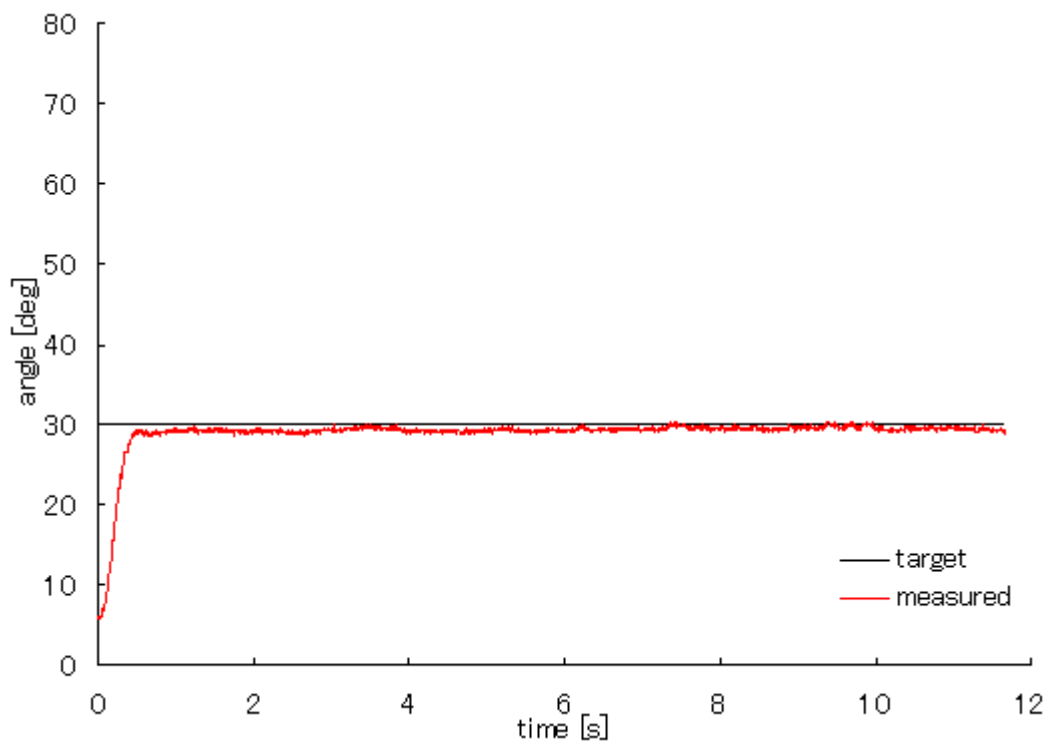


図 5.10 基本オフセット圧力 1.8[atm]時の角度変化

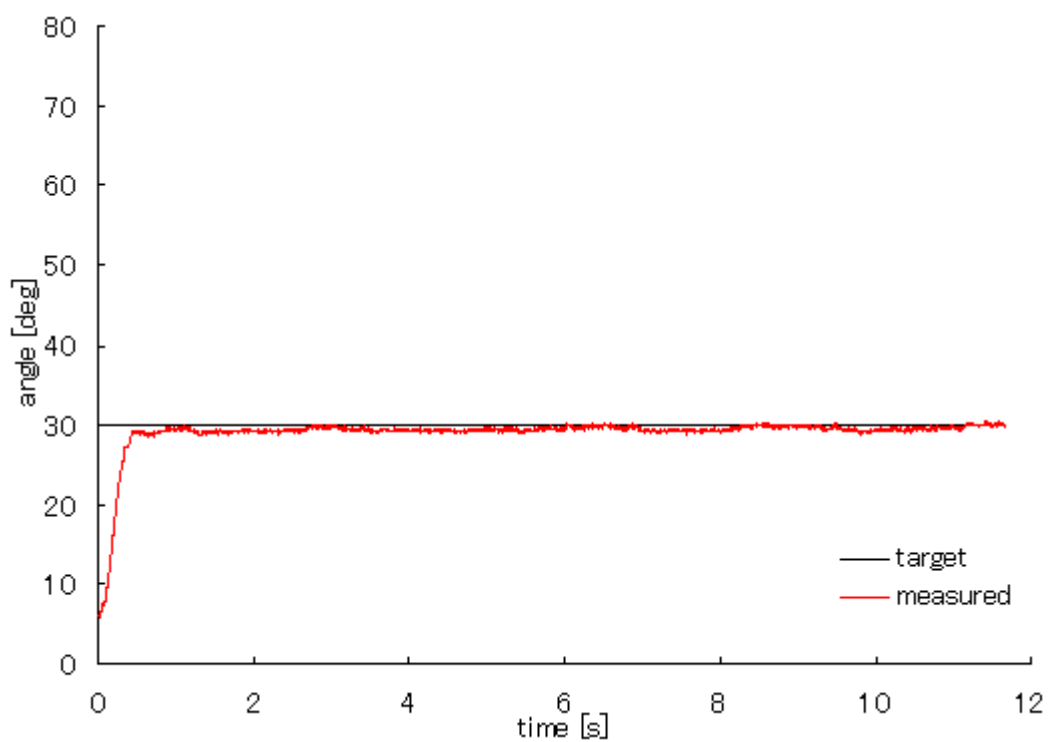


図 5.11 基本オフセット圧力 1.9[atm]時の角度変化

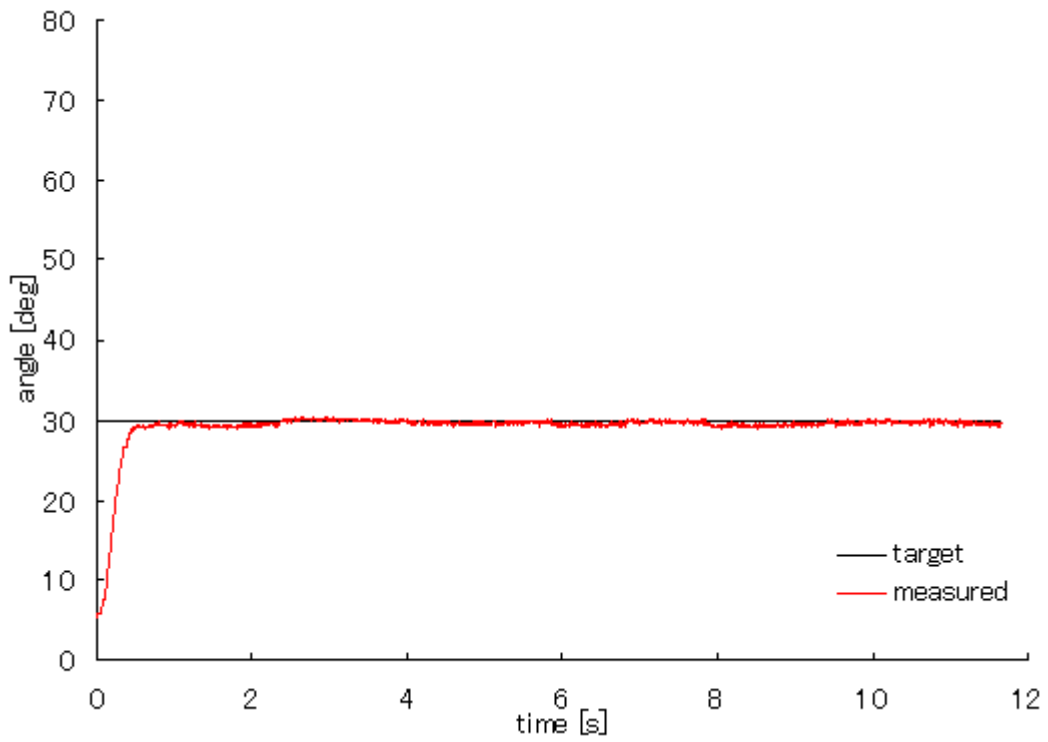


図 5.12 基本オフセット圧力 2.0[atm]時の角度変化

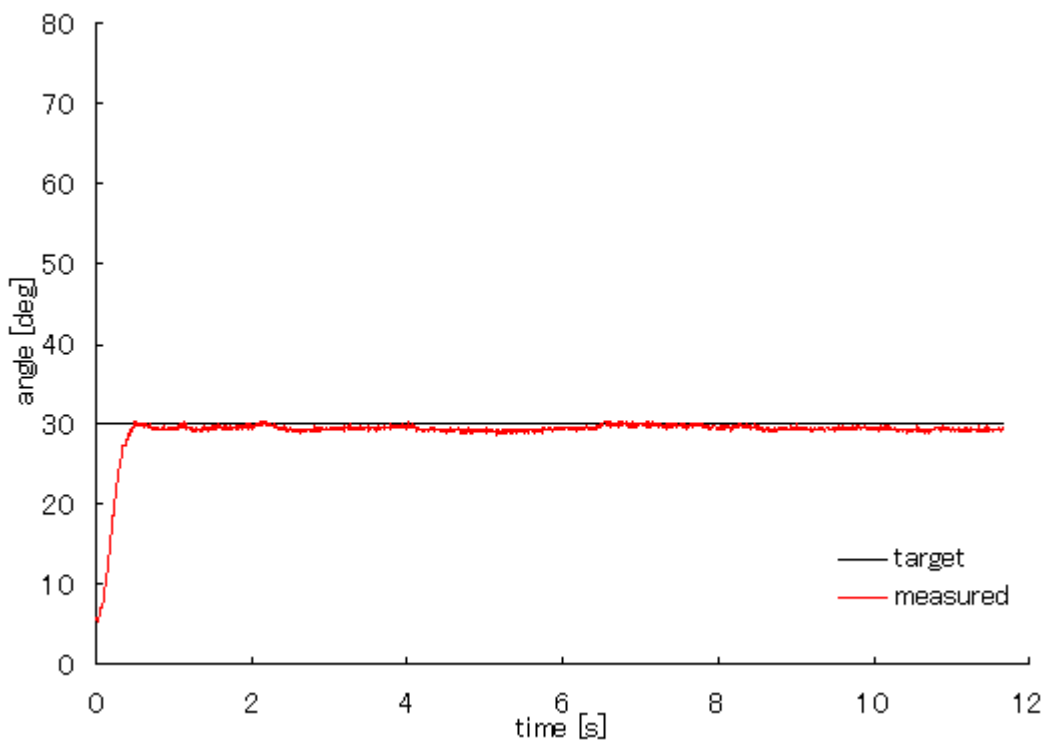


図 5.13 基本オフセット圧力 2.1[atm]時の角度変化

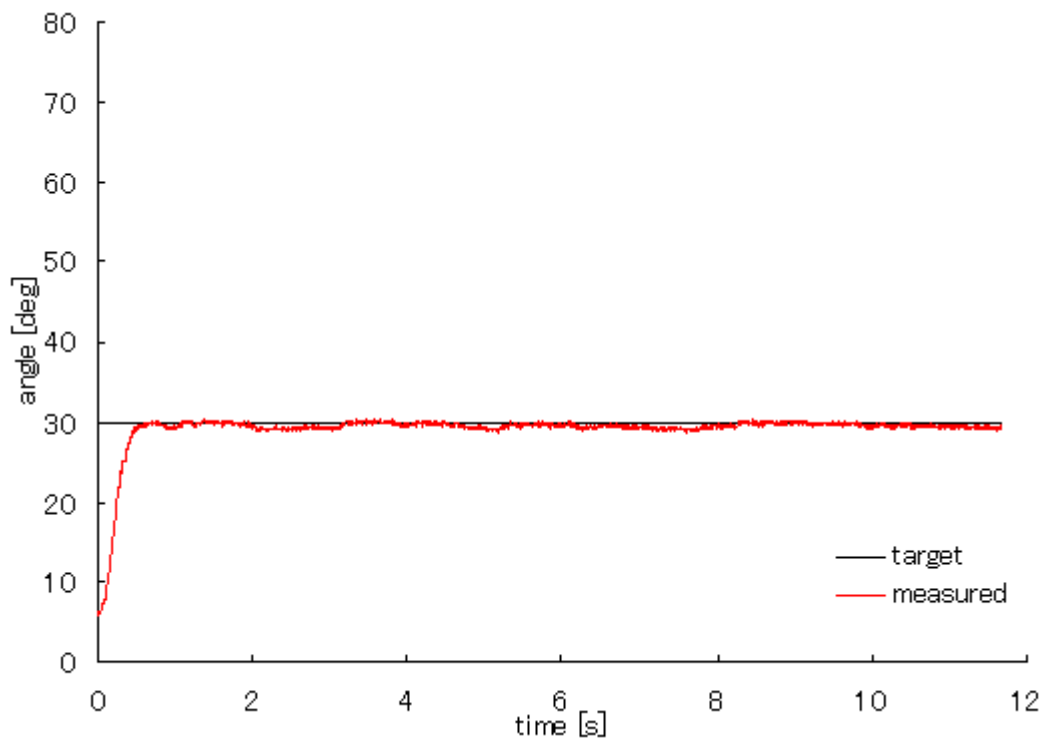


図 5.14 基本オフセット圧力 2.2[atm]時の角度変化

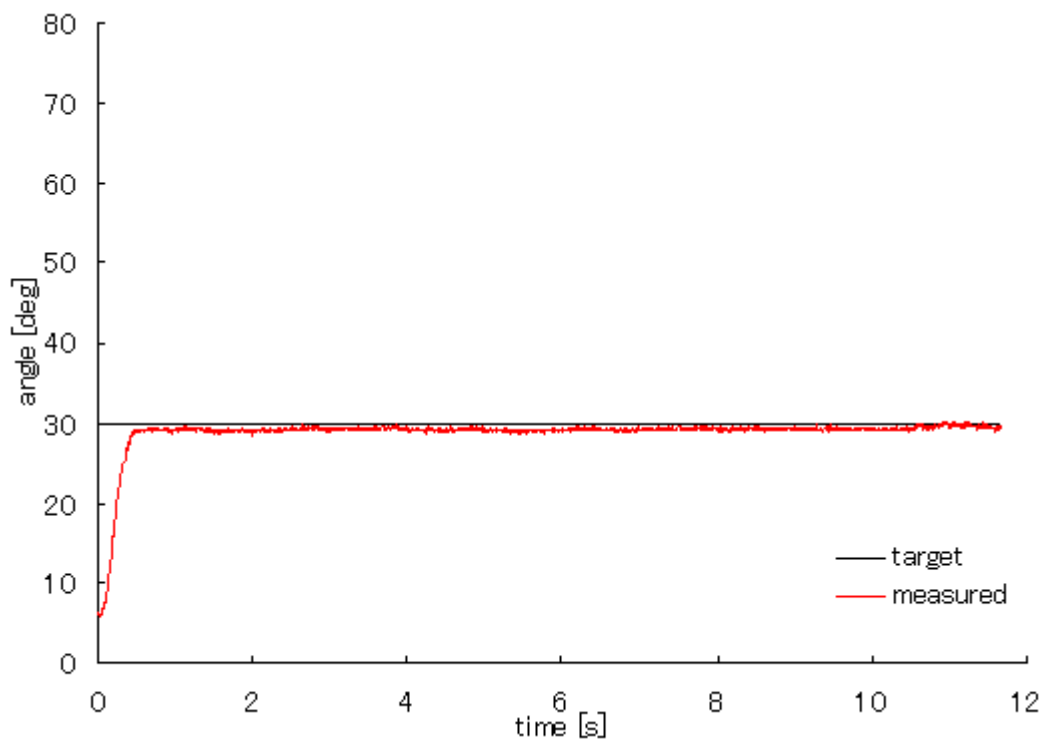


図 5.15 基本オフセット圧力 2.3[atm]時の角度変化

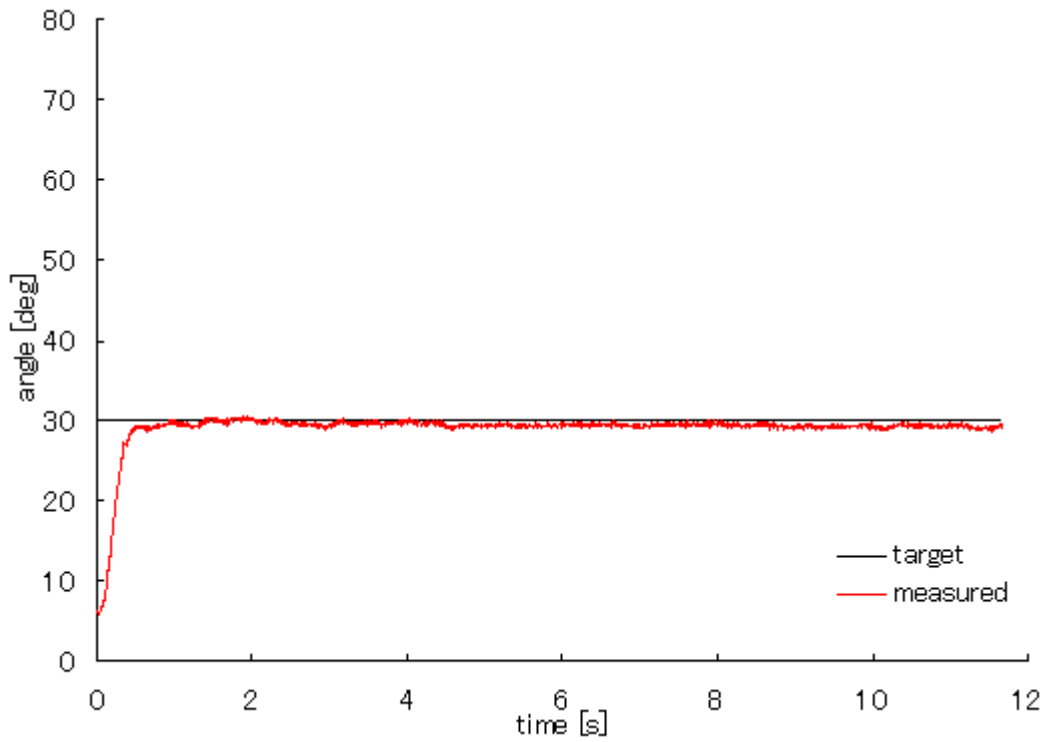


図 5.16 基本オフセット圧力 2.4[atm]時の角度変化

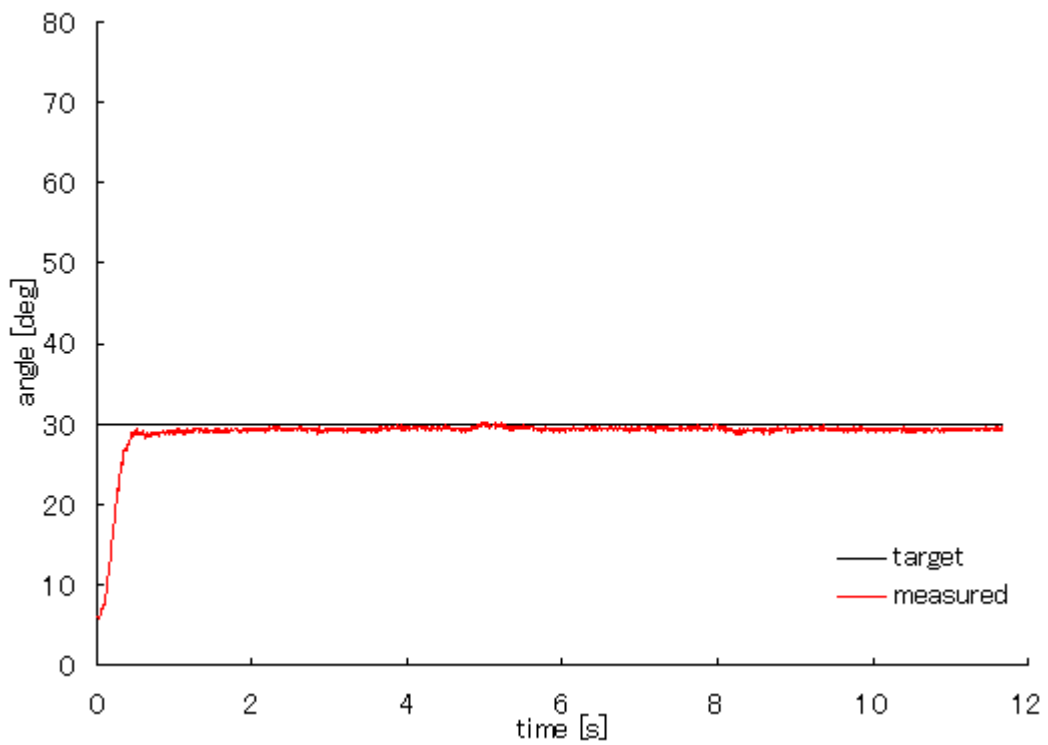


図 5.17 基本オフセット圧力 2.5[atm]時の角度変化

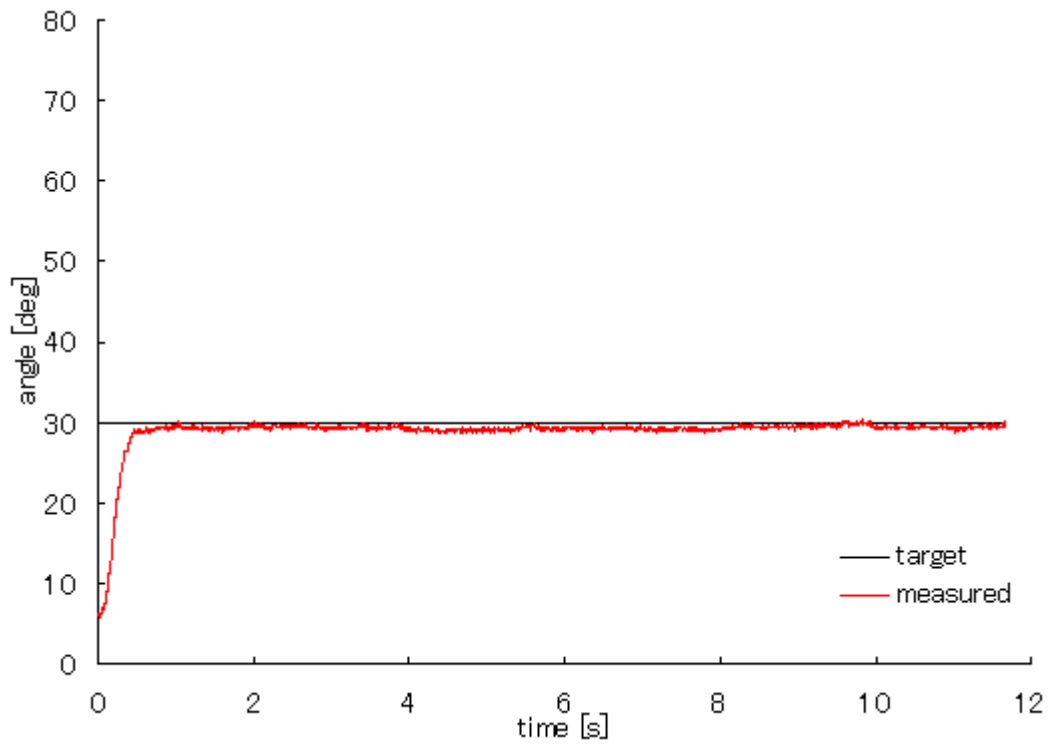


図 5.18 基本オフセット圧力 2.6[atm]時の角度変化

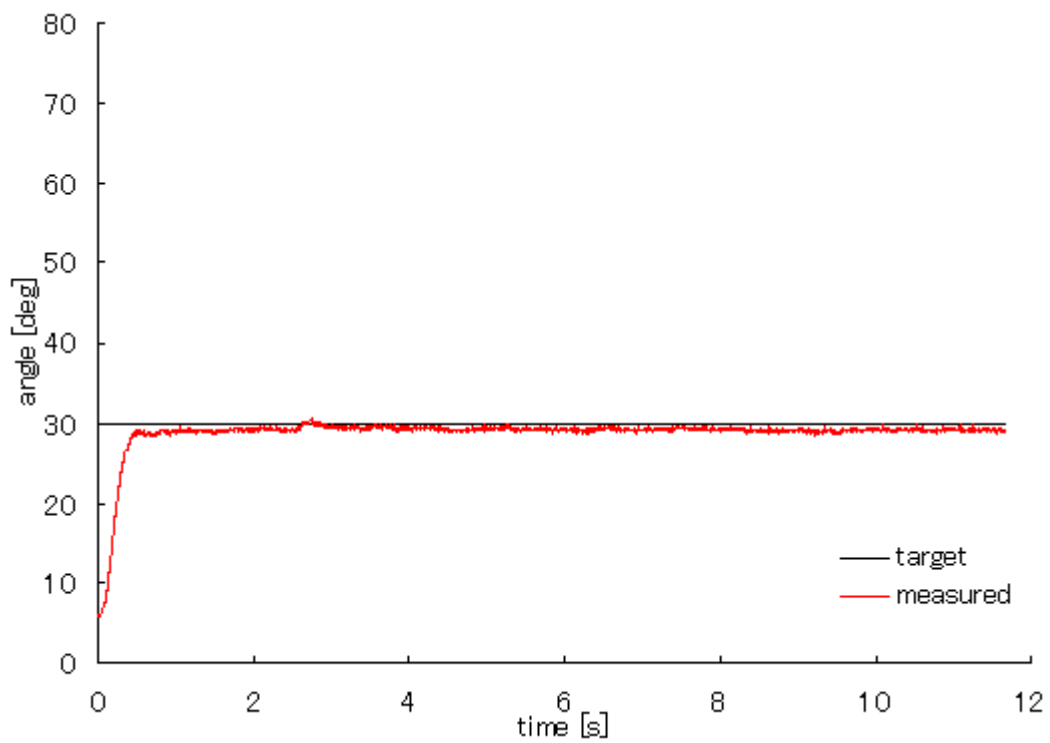


図 5.19 基本オフセット圧力 2.7[atm]時の角度変化

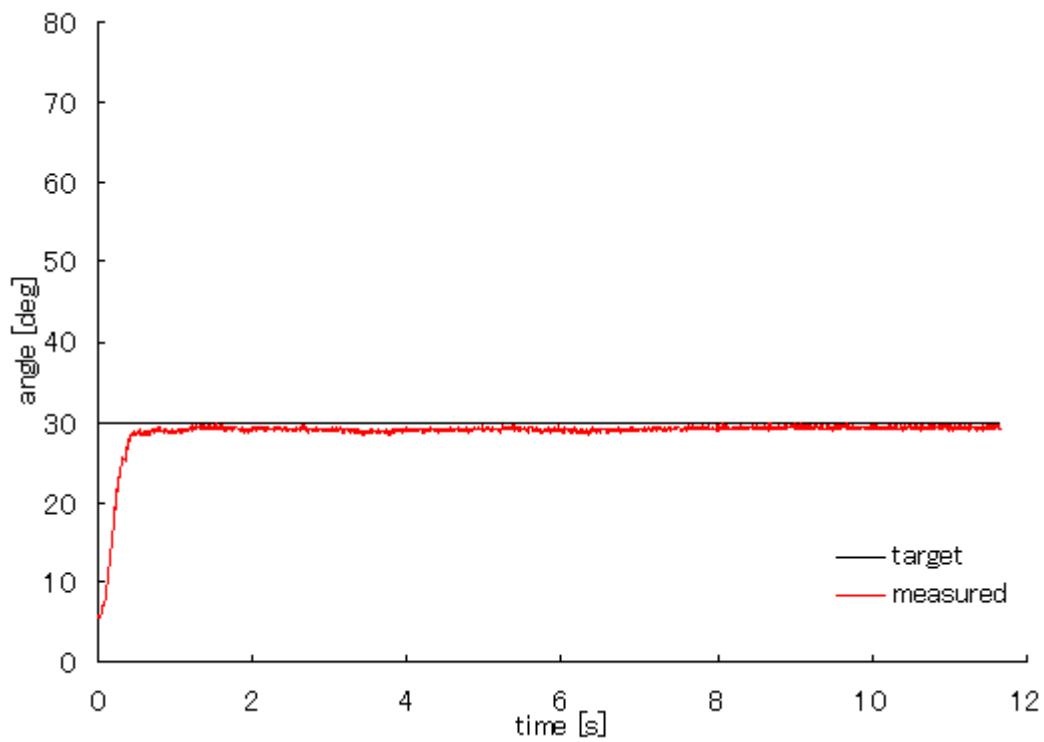


図 5.20 基本オフセット圧力 2.8[atm]時の角度変化

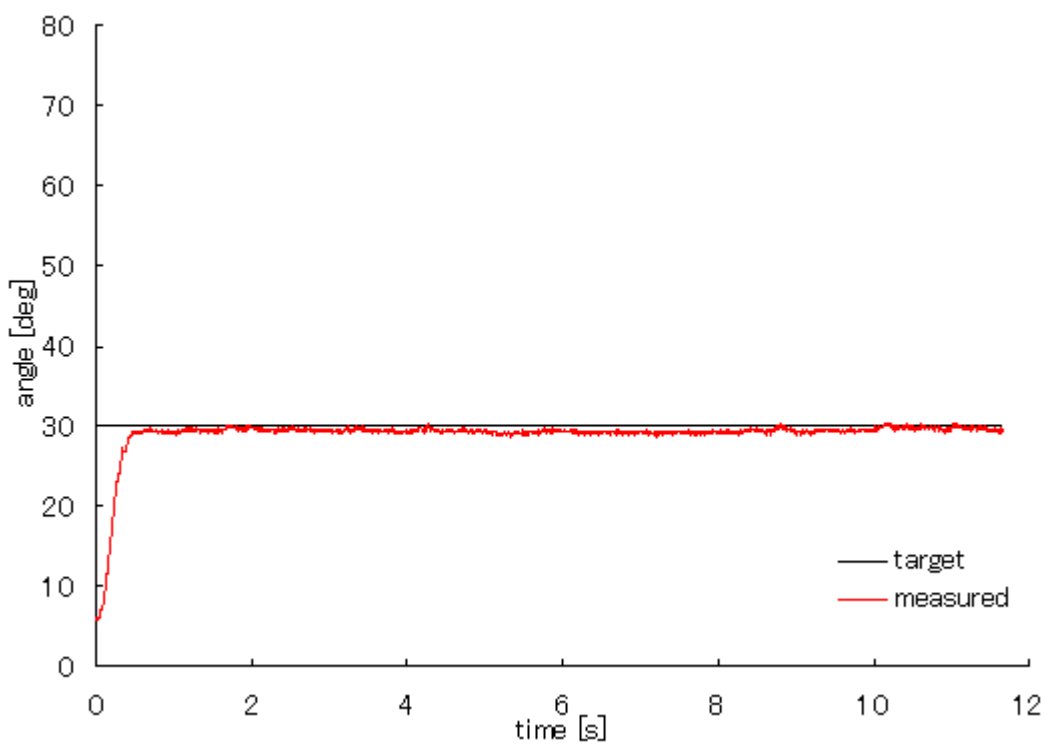


図 5.21 基本オフセット圧力 2.9[atm]時の角度変化

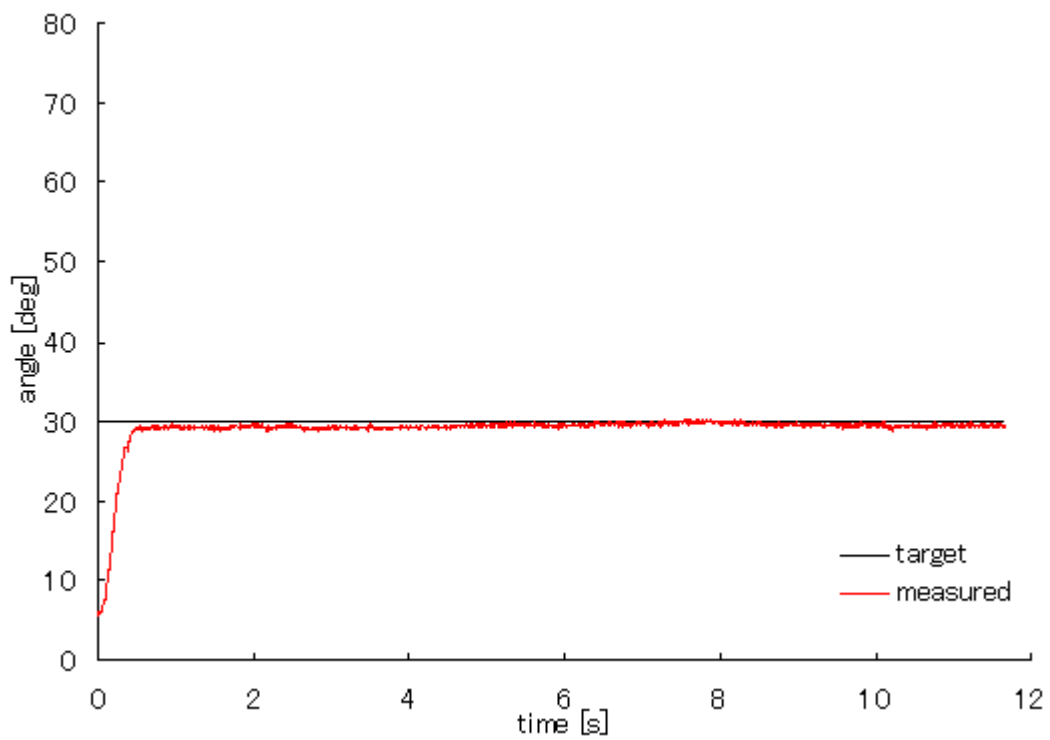


図 5.22 基本オフセット圧力 3.0[atm]時の角度変化

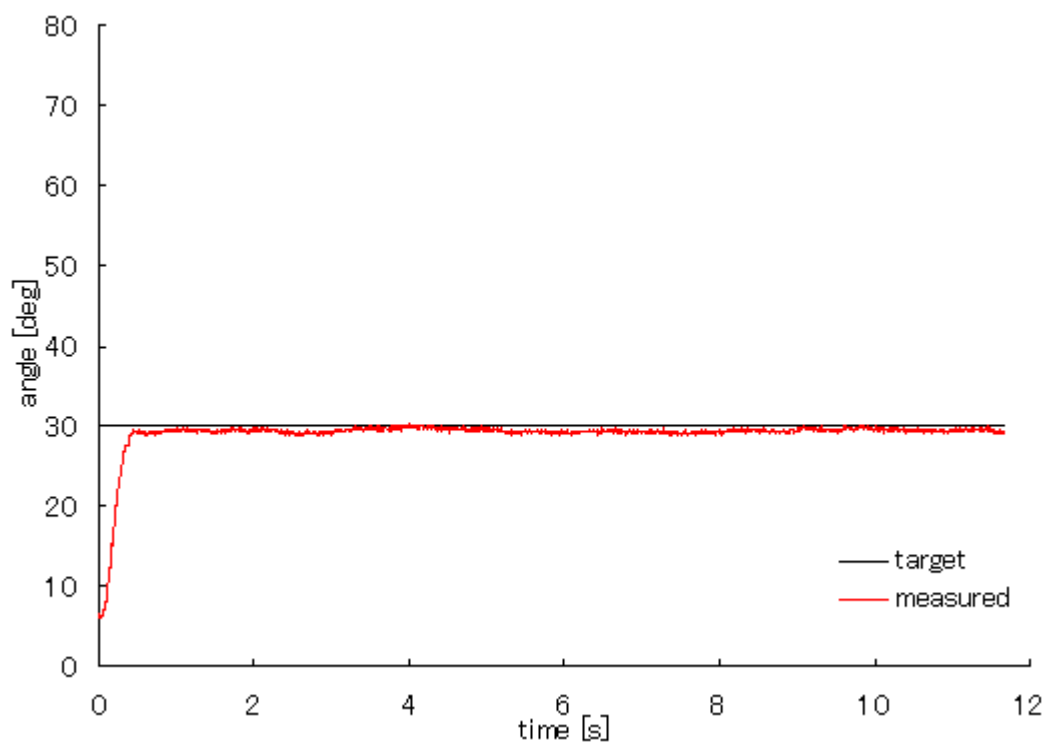


図 5.23 基本オフセット圧力 3.1[atm]時の角度変化

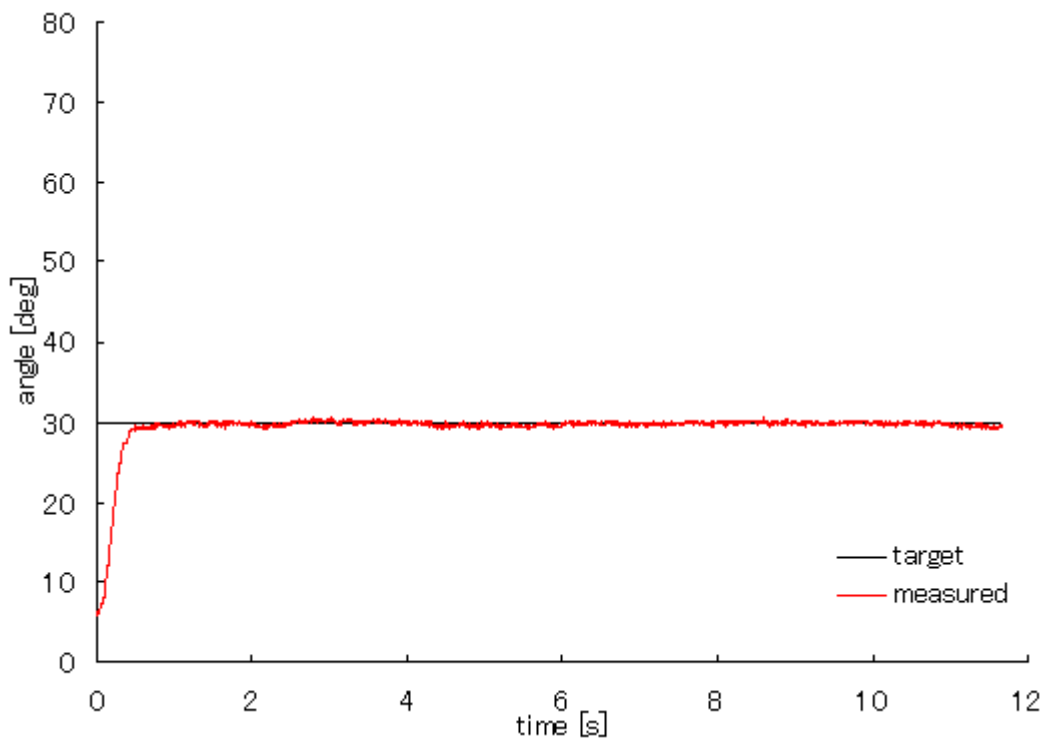


図 5.24 基本オフセット圧力 3.2[atm]時の角度変化

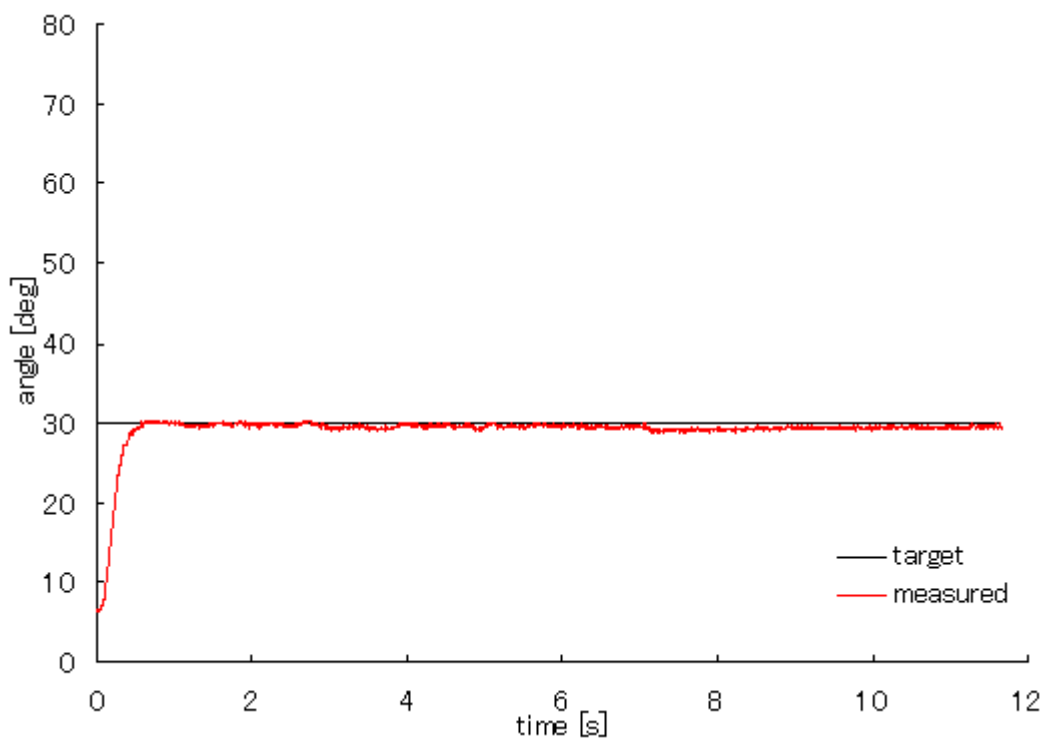


図 5.25 基本オフセット圧力 3.3[atm]時の角度変化

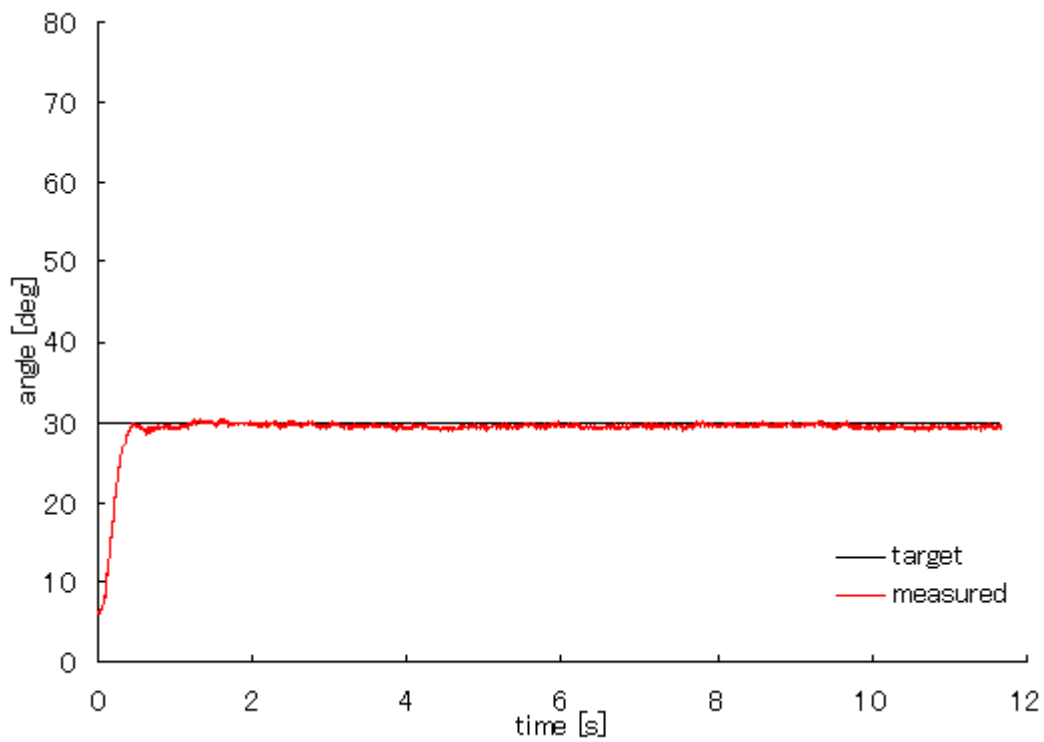


図 5.26 基本オフセット圧力 3.4[atm]時の角度変化

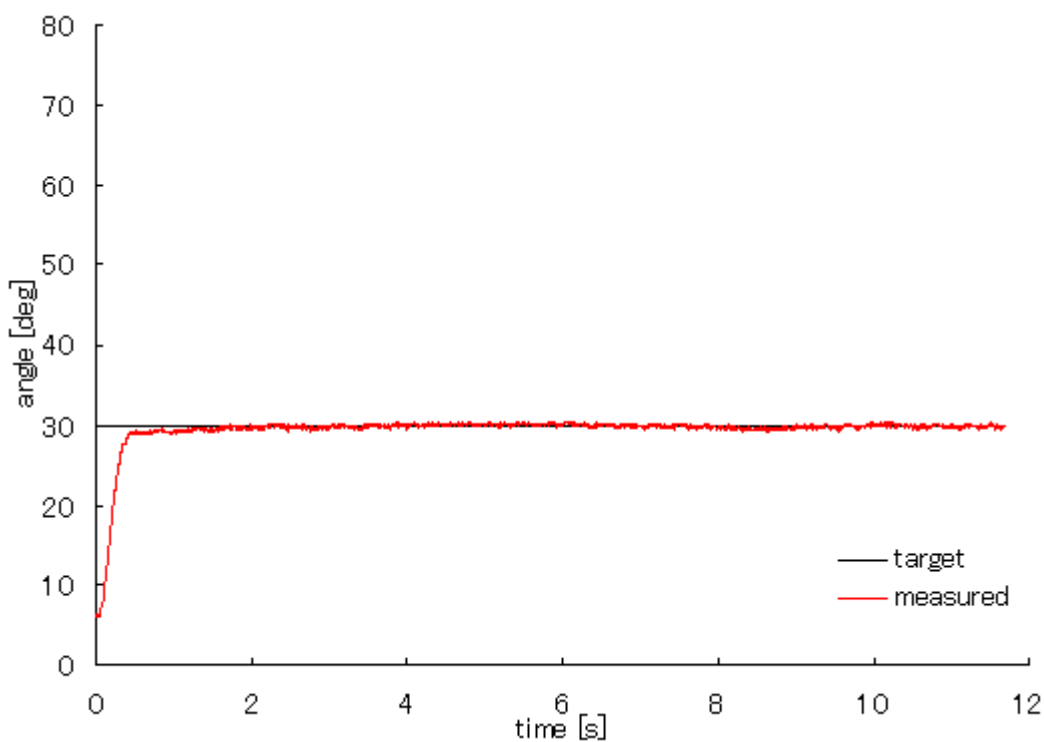


図 5.27 基本オフセット圧力 3.5[atm]時の角度変化

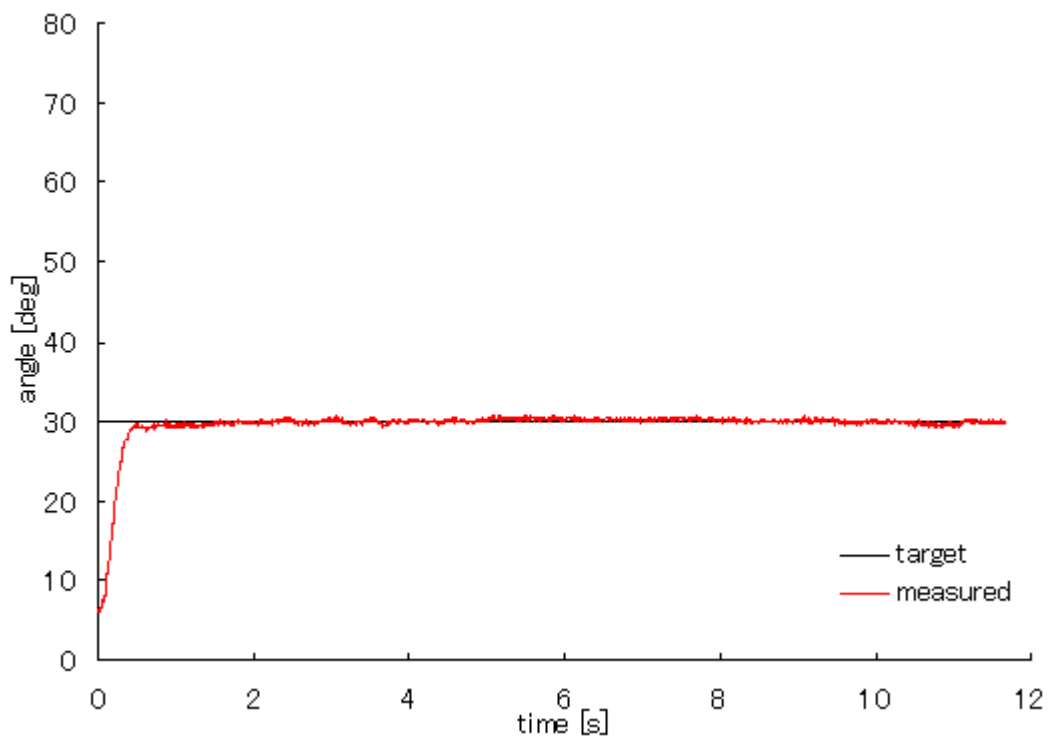


図 5.28 基本オフセット圧力 3.6[atm]時の角度変化

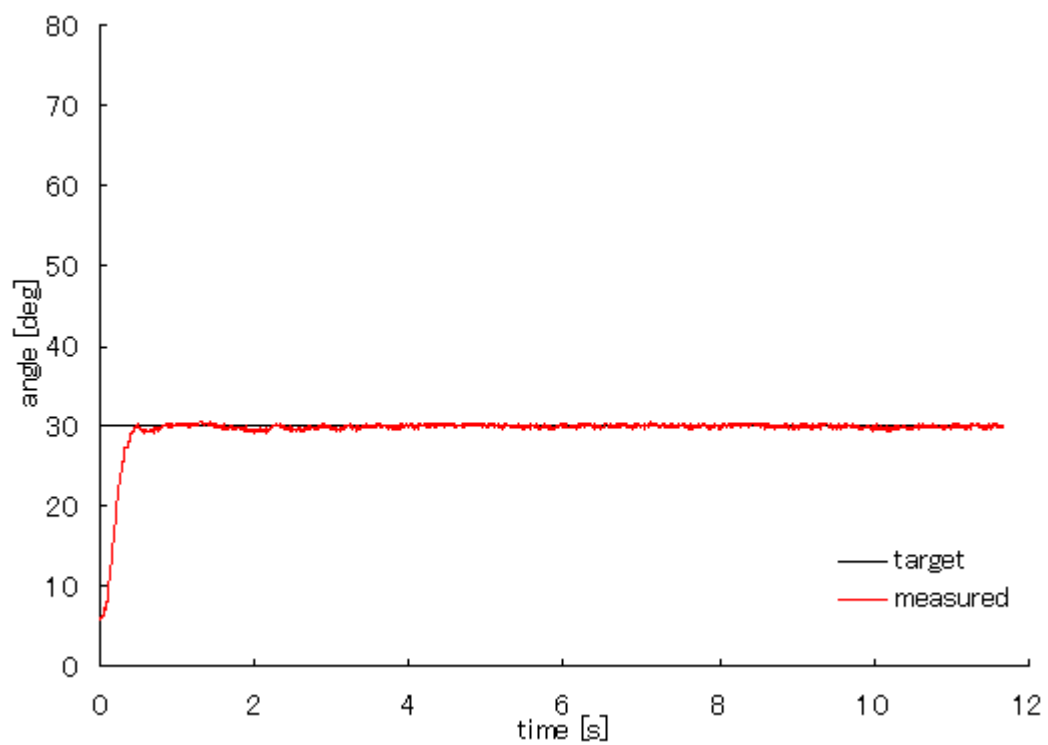


図 5.29 基本オフセット圧力 3.7[atm]時の角度変化

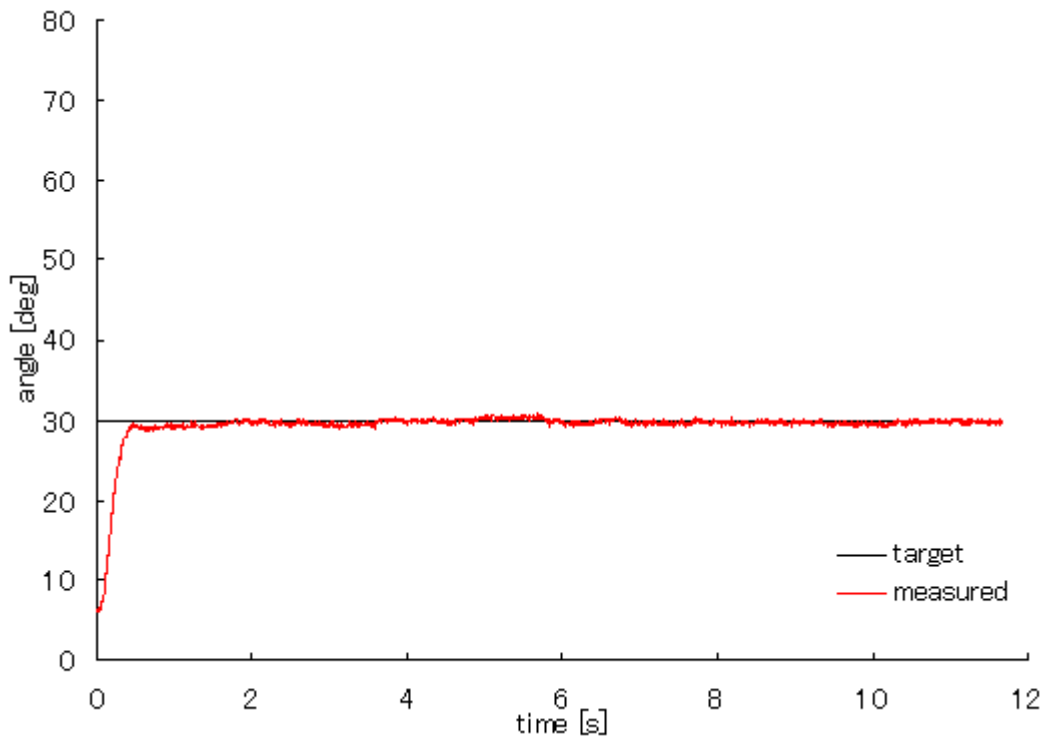


図 5.30 基本オフセット圧力 3.8[atm]時の角度変化

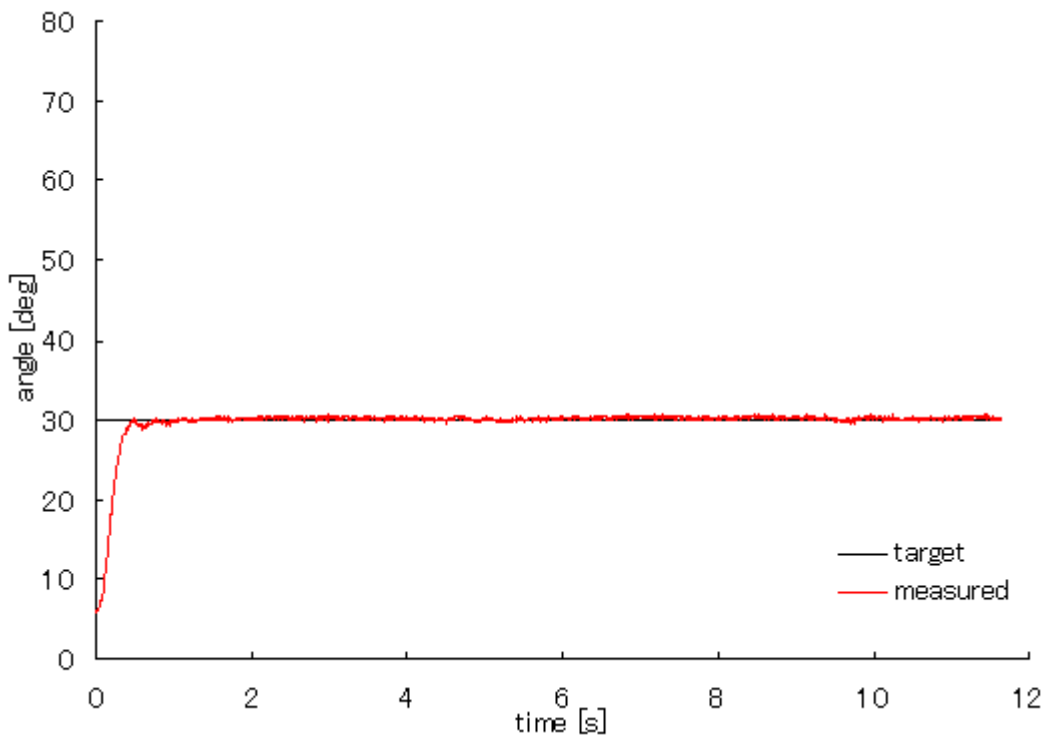


図 5.31 基本オフセット圧力 3.9[atm]時の角度変化

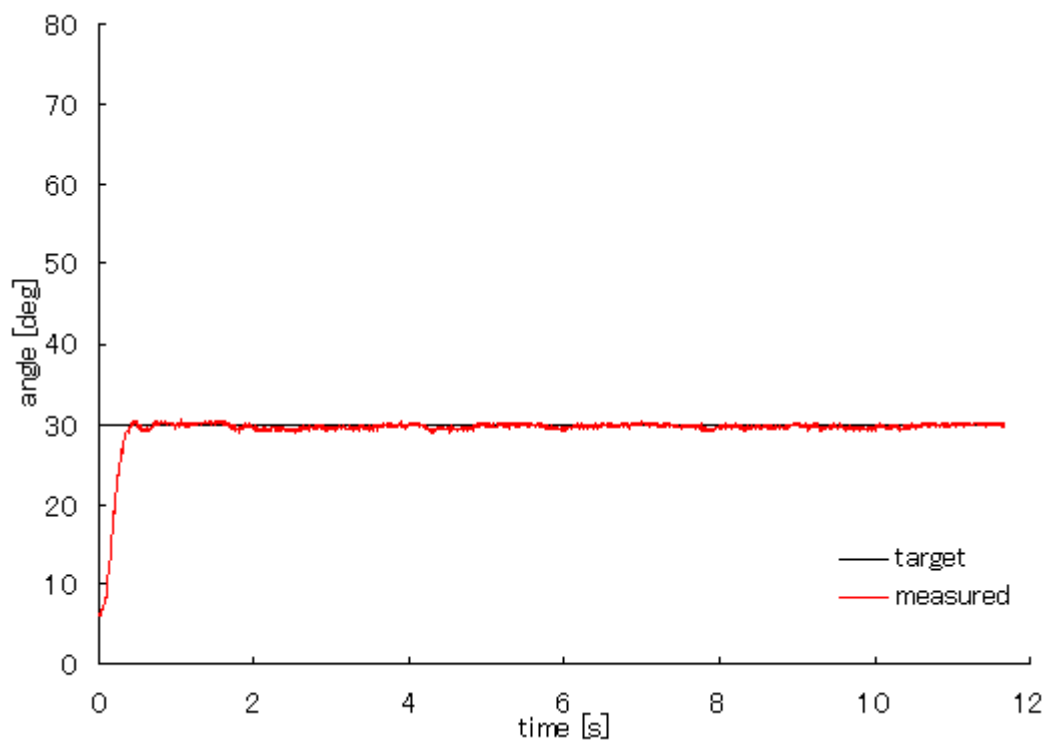


図 5.32 基本オフセット圧力 4.0[atm]時の角度変化

5.2 負荷の変化に対する影響

空気圧アクチュエータが、ロボットに使用された場合、重さの異なる負荷が与えられる場合が、考えられる。その場合、本研究の制御方法は、制御ゲインを変更することなく、制御できる必要がある。そこで、異なる3種類の負荷を与えた場合の実験を行った。目標値として、30[deg]のステップ入力を与えた。その結果が、図 5.33 から図 5.35 である。与えた負荷は、ロボットアーム自体の自重(負荷なし)、棒状重りの 180[g]、樹脂製ハンドモックの 460[g]の3種類である。制御ゲインは、棒状の重りを付けた状態で決定した。また、制御ゲインは変更せず、負荷に関するパラメータのみ変更し、基本オフセット圧力は 2[atm]とした。

次に、ロボットアームの先端にロボットハンドを搭載した場合の仕事を想定した場合の負荷変化に対する実験を行った。この場合、ロボットアーム先端に、樹脂製ハンドモックをロボットハンドとみなし、取り付けた。制御ゲインは、ロボットアーム先端に樹脂製ハンドモックが取り付けられた状態で、第4章で示した決定方法を使用して、決定した。その出力結果が、図 5.36 である。そして、ロボットハンドが何か物体を掴む仕事を想定し、500[g]の負荷を追加した。従って、この場合における負荷は、樹脂製ハンドモックの 460[g]と 500[g]の負荷を合計した 960[g]である。その出力結果が、図 5.37 である。この場合においても、制御ゲインは変更せず、負荷に関するパラメータのみ変更した。結果より、重い負荷を加えた場合において、制御ゲインを変更せずとも、オーバーシュートが少なく、安定的に制御できた。

制御ゲインを決定した負荷の2倍以上を与えた場合において、制御ゲインを変更せずに、大きなオーバーシュートを生じることなく、適切に制御可能となっている。従って、本研究が提案する制御方法は、ロボットアーム等への使用も可能である。

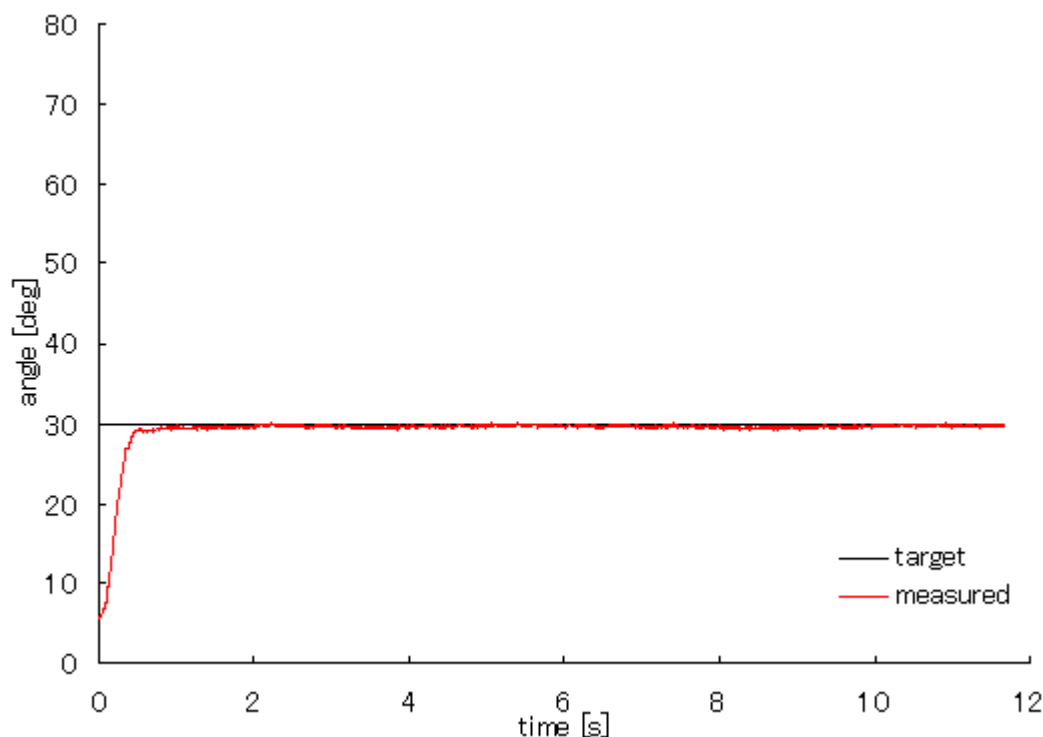


図 5.33 棒状重り負荷の角度変化

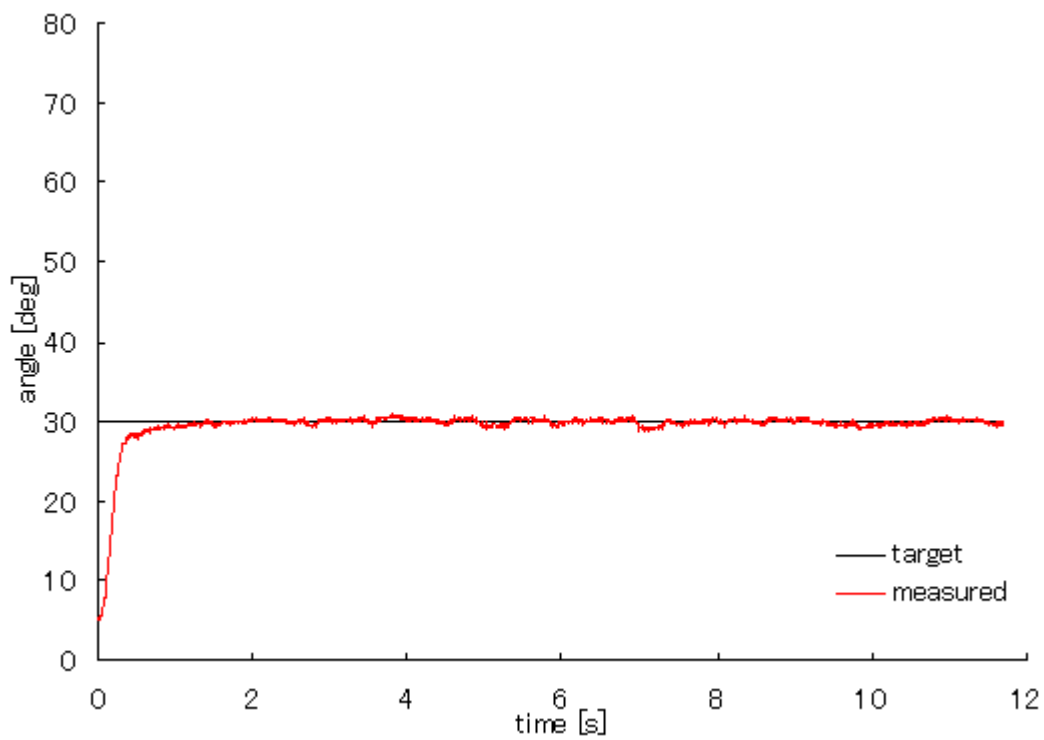


図 5.34 負荷なしの角度変化

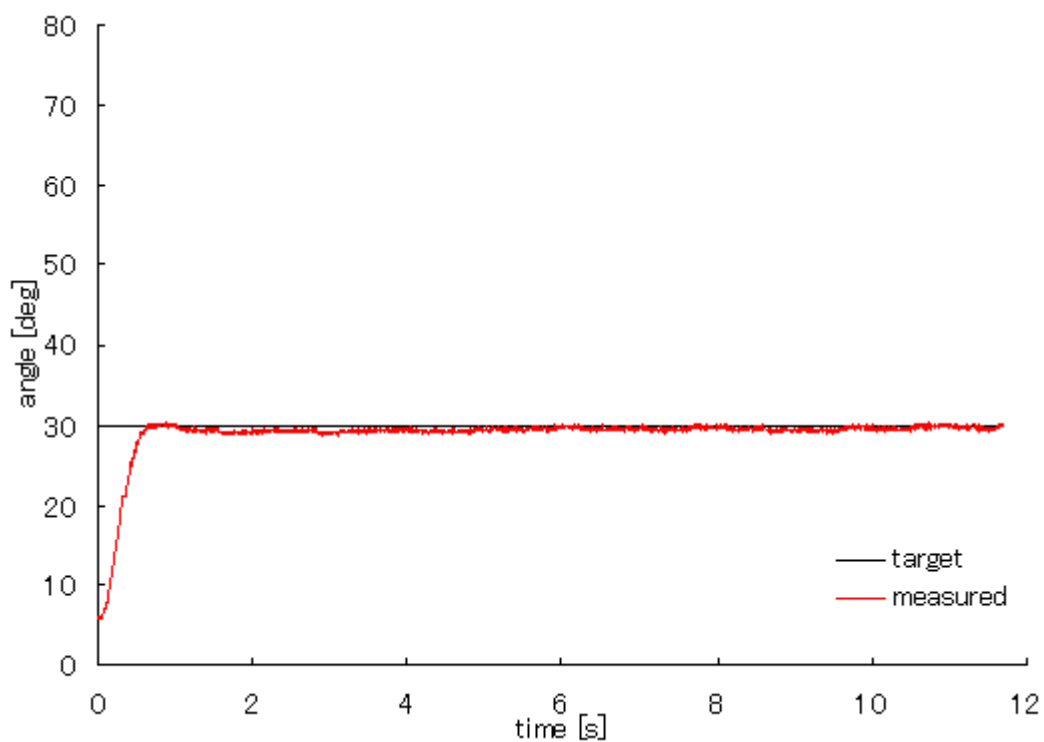


図 5.35 樹脂製ハンドモック負荷の角度変化

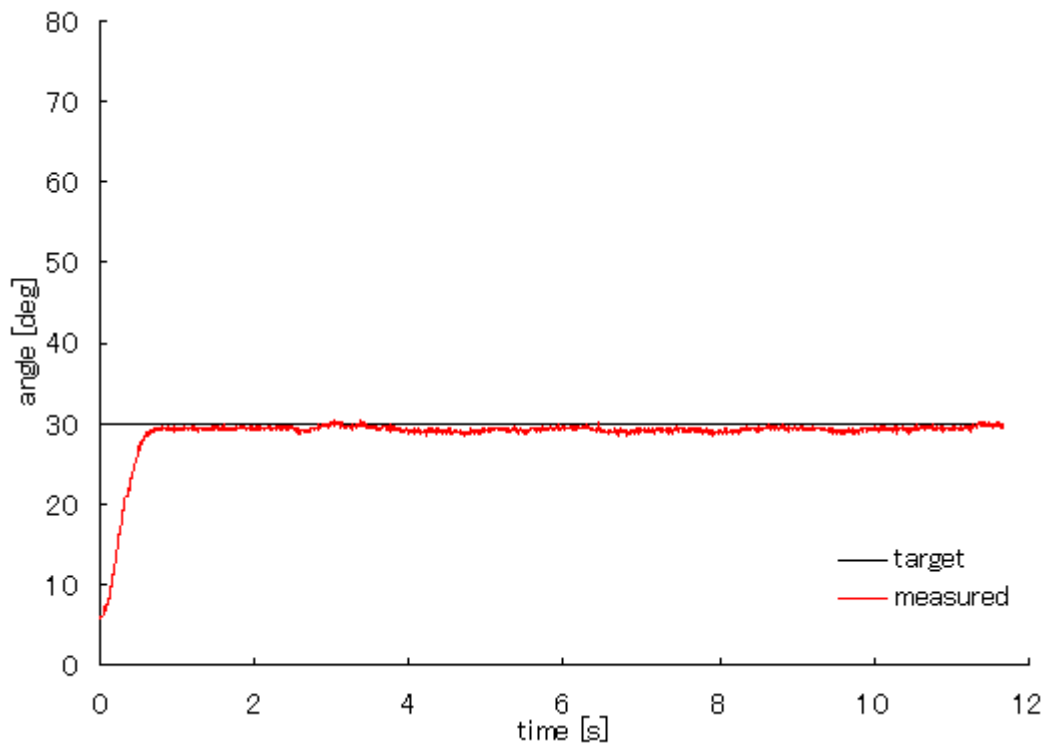


図 5.36 制御ゲイン再調整による樹脂製ハンドモック負荷の角度変化

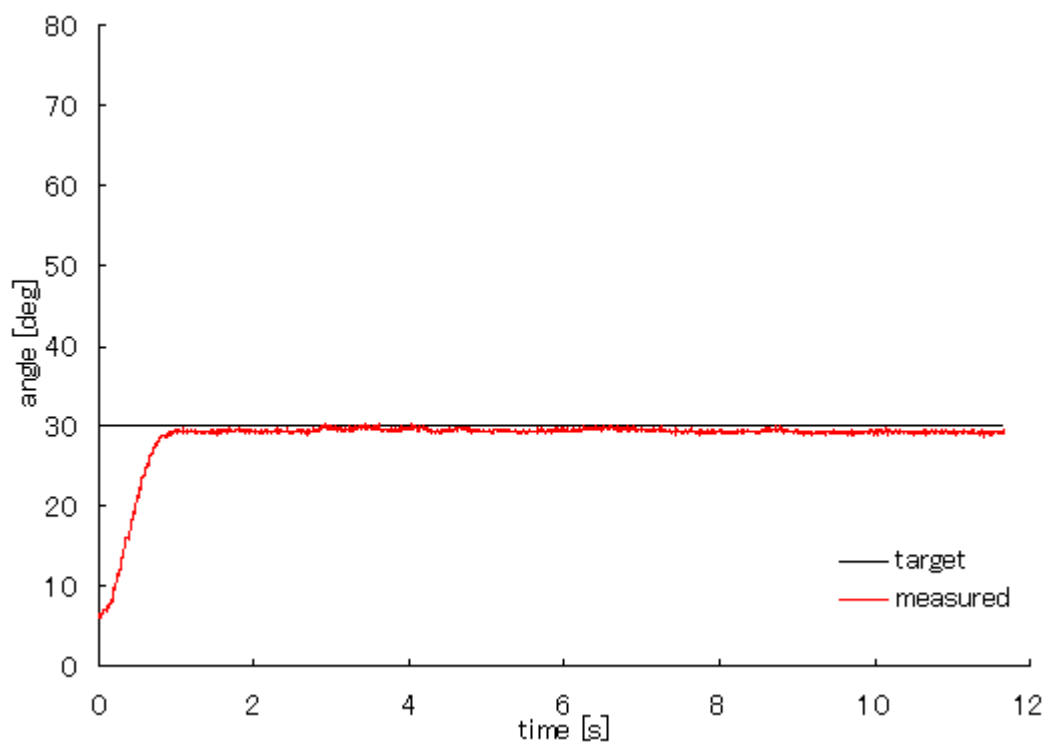


図 5.37 制御ゲイン再調整による樹脂製ハンドモック+500[g]負荷の角度変化

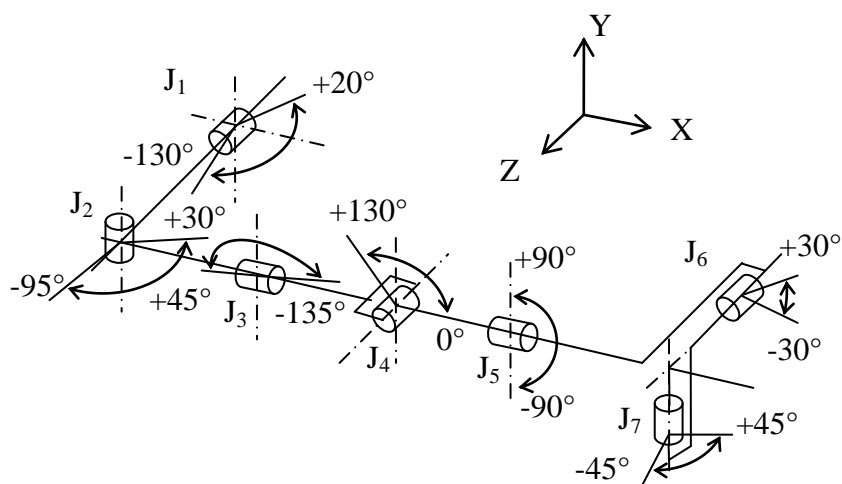
第6章 制御実験

6.1 ロボットアーム概要

本研究では、7つのエアシリンダより構成され、人の腕を模した形状の7自由度を有するロボットアームを使用して、実験を行なった。

空気圧で大きな出力を得るためには直径とストロークの大きなシリンダが必要になる。そのようなシリンダを大きさや運動可動域が人間並みのヒト型ロボットアームに内蔵することは困難であり、またそれがアーム内の空間の大部分を占め、アームの運動等に影響を及ぼしてしまう。そのため従来のヒト型ロボットアームでは、シリンダからなる駆動機構をアーム外部に設けワイヤ・プーリ機構で動力を手先まで伝達する手法が取られてきた。この手法では駆動機構のための大きな占有空間を必要とし、機構全体の重量がかさみ、更にワイヤの伸びや摩擦による運動精度や効率の低下が避けられない。

そこで、エアシリンダ自体が有する高い強度を活用し、ヒト型ロボットアームの上腕節、前腕節の軸にエアシリンダを組み込み、シリンダを骨格として利用することを考案した。また、一つのシリンダに対して二つのバルブを備えたことで、人間の腕の運動を生み出している筋肉構造である、主働筋-拮抗筋構造を待たせることも実現した。そして、そのエアシリンダの直線運動を軸周りの回転運動に変換するねじり機構によって回旋運動をも可能とした。この内骨格構造により、人間と同程度の大きさで同じく7自由度を持ち、腕の全長は81[cm]、重さは3[kg]であり、図6.1に示すように広可動域を持つ軽量かつ強固なロボットアームを実現している[6]。



(a) 関節可動域

(b) 外観写真

図 6.1 7自由度を持つロボットアーム

6.1.1 関節の名称

本研究で使用したロボットアームの関節は、図 6.1-(a)のように、 J_1 から J_7 まで存在する。それぞれの関節の名称は、次のようになる。 J_1 は肩屈伸関節、 J_2 は肩内外転関節、 J_3 は肩回旋関節、 J_4 は肘屈伸関節、 J_5 は肘回旋関節、 J_6 は手首屈伸関節、 J_7 は手首屈伸関節である。さらに、肩回旋関節 J_3 と肘屈伸関節 J_4 との間の距離は 300[mm]、肘屈伸関節 J_4 と手首屈伸関節 J_7 との間の距離は 230[mm]である。

また、図 6.2 は、肩屈伸関節におけるエアシリンダロッドのストロークとロボットアーム関節角度との関係を示す図である。図 6.2 におけるデータは、0[deg]から 90[deg]までの 10[deg]刻みにおけるエアシリンダロッドのストロークの変化を定規により測定したデータである。そのため、多少の計測誤差を含んだ結果となっている。本研究で使用した肩屈伸関節におけるエアシリンダロッドのストロークとロボットアームの関節角度は、概ね線形の関係である。

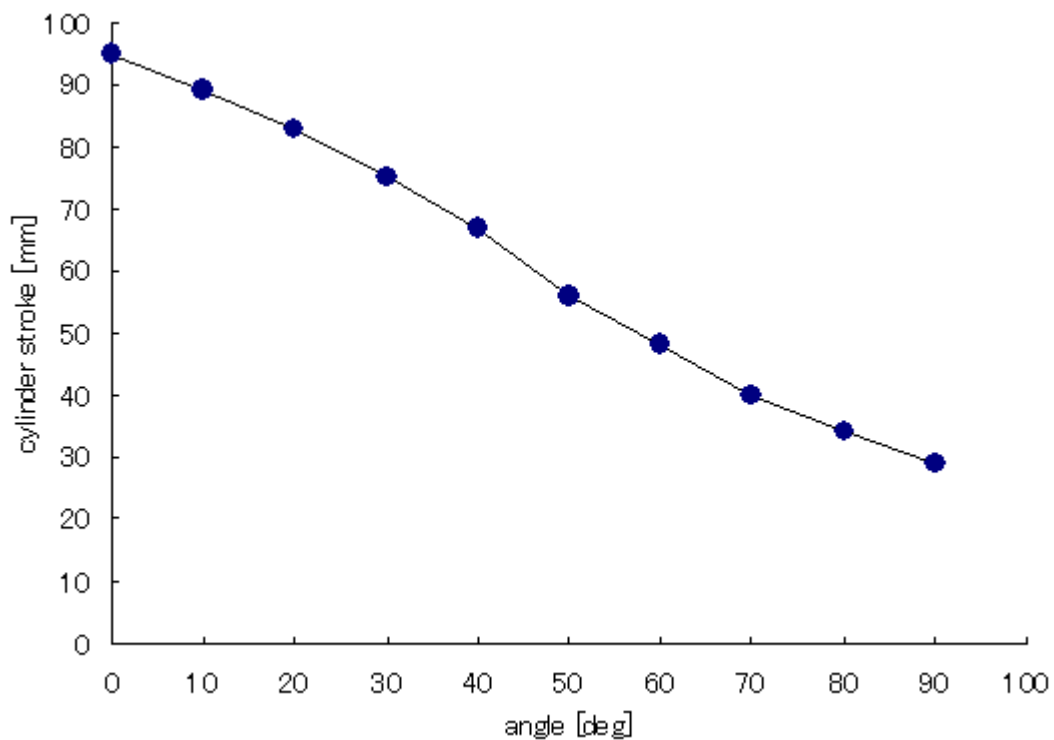


図 6.2 肩屈伸関節におけるエアシリンダロッドストロークと関節角度

6.1.2 空気圧の流れ

本研究において、使用したロボットアームにおける空気圧の流れを図 6.3 に示す。エアコンプレッサ(MAX AK-HL1230EII)において生み出した空気圧は、高い圧力となっている。この高い圧力の空気圧をロボット等に入力してしまうと故障してしまう。従って、エアコンプレッサからの空気圧の圧力を調節する必要がある。さらに、エアコンプレッサにおいて生み出した空気圧には、水分や油分が含まれていることが多い。そのため、これらの余計な成分を空気圧から除去する必要がある。圧力の調整と余計な成分を除去する装置が、フィルタレギュレータ(SMC AW30-03BE)と呼ばれるものである。エアコンプレッサから 9.0[atm]の空気圧が供給されるが、フィルタレギュレータにより、6.0[atm]まで低下させた空気圧が出力される。フィルタレギュレータから出力された空気圧をそのままロボットアームへ入力しても、ロボットアームを制御することはできない。そこで、ロボットアームへ入力する空気圧の圧力を調節する装置が必要となる。その装置が、電空ハイレグ(SMC VY1B00)である。この電空ハイレグは、電磁弁と減圧弁が一体となったものであり、制御プログラムから与えられた指令圧力を出力可能である。制御プログラムから適切に制御された指令圧力が、電空ハイレグから出力されることにより、ロボットアームを制御することが可能となる。

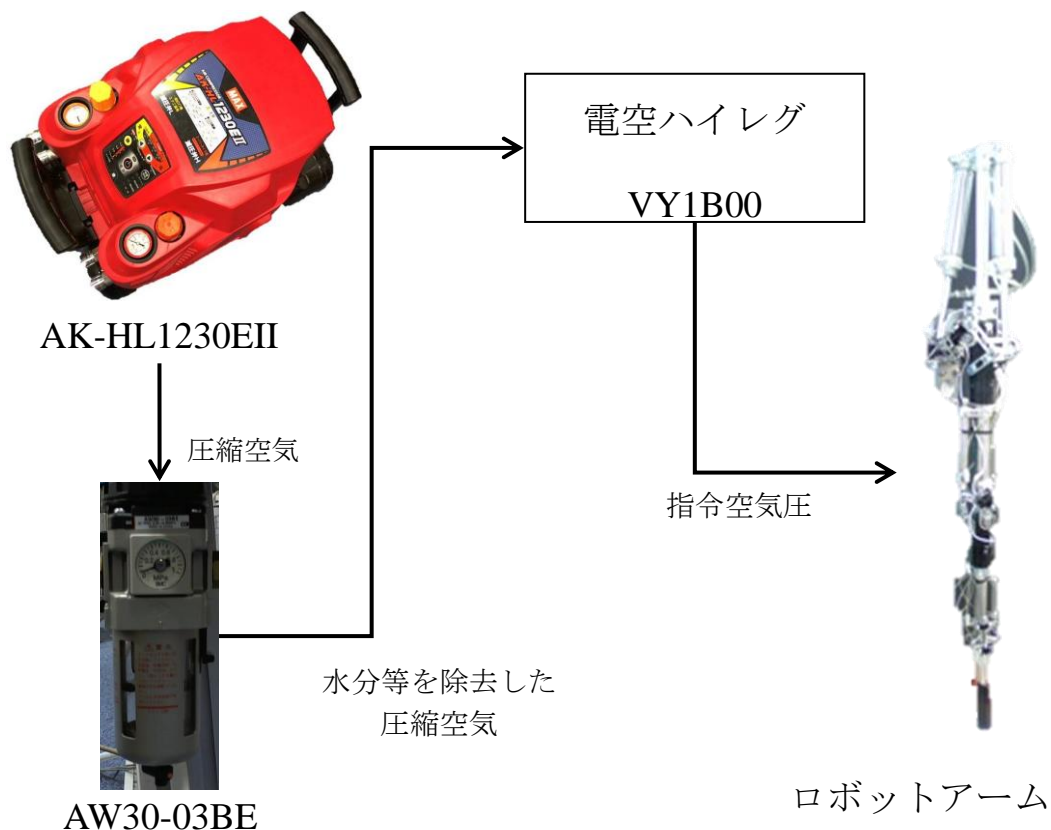


図 6.3 空気圧の流れ

6.1.3 電気信号の流れ

本研究において、使用したロボットアームにおける電気信号の流れを図 6.4 に示す。ロボットアームの角度変化は、ポテンショメータを使用して検出する。7 自由度の各関節にポテンショメータが設置されているため、7 個のポテンショメータを使用している。ポテンショメータからの角度信号は、マイコンにより A/D 変換され、RS-232C 通信により制御プログラムが動作しているパソコンへと取り込まれる。その取り込まれた角度データから、制御プログラムは、目標値との偏差等を算出し、その算出された値からロボットアームへ出力する指令圧力値が決定される。制御プログラムにより決定された指令圧力値は、電空ハイレグと呼ばれる任意の電圧を与えると、その与えられた電圧に対応した空気圧が排出される装置である。この電空ハイレグは、電磁弁と減圧弁を組み合わせることにより、任意の圧力を出力できるようになっている。この電空ハイレグからの出力された空気圧が、ロボットアームへと入力される。ロボットアームに使用しているエアシリンダが、複動式のエアシリンダであるため、1つのエアシリンダに対して、2個の電空ハイレグが必要となる。そのため、7個のエアシリンダから構成されるロボットアームには、14個の電空ハイレグが必要となる。

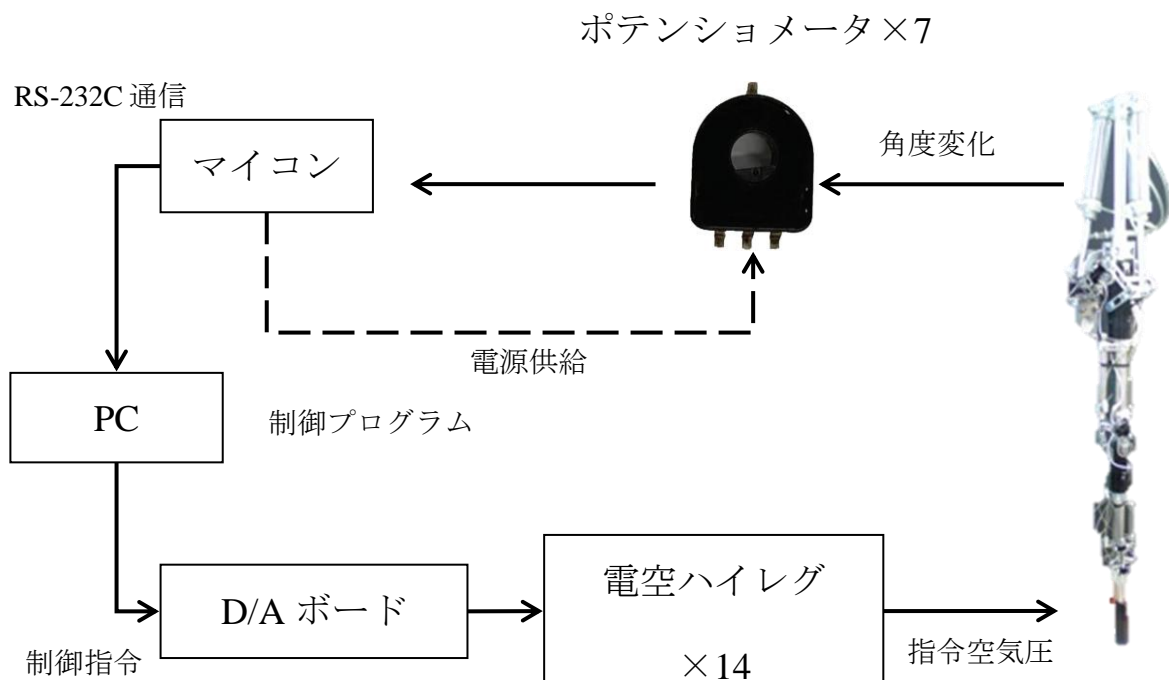


図 6.4 システム全体の電気信号の流れ

6.2 PD 制御と PID 制御における制御ゲインの選定

本研究では、本研究が提案する P+オフセット圧力制御と制御性能を比較する制御として、PD 制御と PID 制御を用いた。PID 制御等の制御ゲインパラメータを決定する方法には、限界感度法や北森の手法[7]という理論的に設定する方法がある。しかし、これらの制御ゲインパラメータ設定方法が、本研究で使用する制御対象に最適とは限らないため、最適と考えられる PD 制御、PID 制御の制御ゲインパラメータは、実験的に決定した。

また、各制御ゲインは、オーバシュートの発生が、目標値に対して、1.5[%]以下となるように、決定した。

6.3 ステップ入力とランプ入力による評価実験

最適と考えられる制御ゲインを用いた PD 制御, PID 制御と P+オフセット圧力制御の制御性能の比較を行なった. 制御を行なったロボットアームの関節は, 肩屈伸関節とし, 残りの関節は, 1 つの直線的なリンクとなるように固定して, 制御実験を行なった. 指令目標値として, ステップ入力を与えた定常状態になった後に, ランプ入力を与えた. ステップ入力は, 安全的に動作可能な関節可動域のおよそ半分となる 40[deg]とした. また, ランプ入力の増加率は, +2.0, -2.0[deg/s]として比較実験を行なった.

その結果が, 図 6.5 から図 6.10 となり, 制御性能を示すパラメータを表 6.1 と表 6.2 にまとめた. どの制御方法もオーバーシュートが 1.5[%]以下に抑えられている. また, 立ち上がり時間は, 10[deg]から 36[deg]に達するまでの時間とした. 立ち上がり時間は, ランプ入力の増加率が 2.0[deg/s]の場合, PD 制御は 339[ms], PID 制御は 304[ms], 本研究が提案した P+オフセット圧力制御は 284[ms], と PID 制御と比較し 20[ms]早く, 最も早い結果となった. また, ランプ入力の増加率が-2.0[deg/s]の場合においても, 同様の結果が得られている. 最も大きな違いが見られるのが, ランプ入力区間における目標値との絶対値誤差であった. ランプ入力の増加率が 2.0[deg/s]の場合, 目標値と現在値との絶対値誤差が, PD 制御は 2.581[deg], P+オフセット圧力制御は 0.861[deg]であり, P+オフセット圧力制御が PD 制御と比較し, 2 倍以上の追従性の向上が見られた. また, ランプ入力の増加率が-2.0[deg/s]の場合においても, 同様の結果が得られている.

そこで, P+オフセット圧力制御でのランプ入力区間におけるオフセット圧力の両チャンバにおける圧力差平均値を求めると, ランプ入力増加率 2.0[deg/s]の時 0.176[atm], であった. また, PD 制御においては常に, 両チャンバの圧力差は 0.0[atm]となっている. 本研究が提案したオフセット圧力制御は, 目標値と現在値との偏差があると, 推進側チャンバのオフセット圧力を上昇させ, 抵抗側チャンバのオフセット圧力を下降させることにより, オフセット圧力に差圧を発生させる. そのオフセット圧力の差分が生まれると, その差分に応じて, ピストンがオフセット圧力の低いチャンバへ動き易くなる. そのため, P+オフセット圧力制御においては, オフセット圧力の変化により, 差圧が大きくなり, オフセット圧力が低いチャンバ側へピストンが積極的に動き, ランプ入力区間において, PD 制御と比較して追従性が向上したと考えられる.

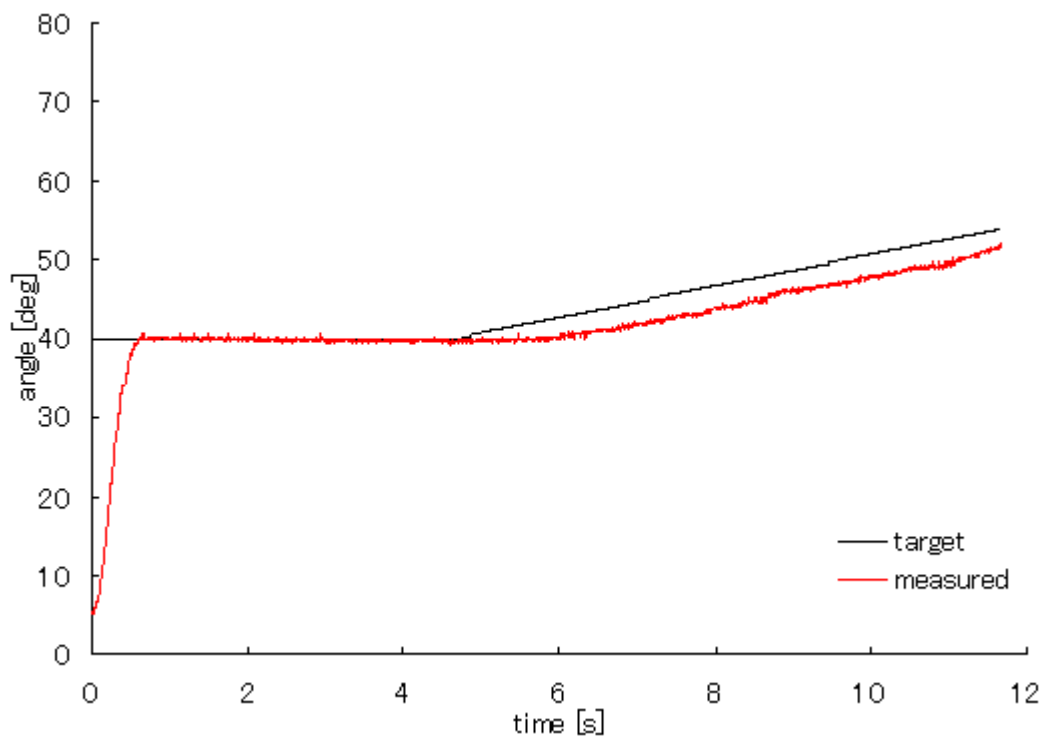


図 6.5 ランプ入力増加率 2.0[deg/s]における PD 制御の角度変化

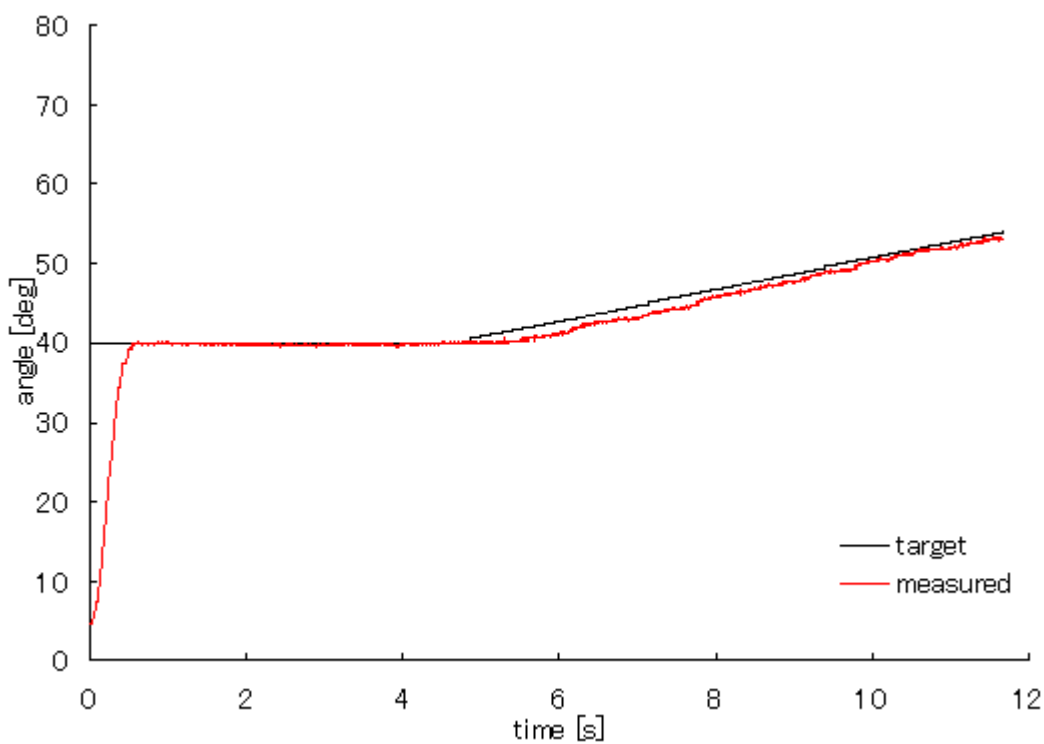


図 6.6 ランプ入力増加率 2.0[deg/s]における PID 制御の角度変化

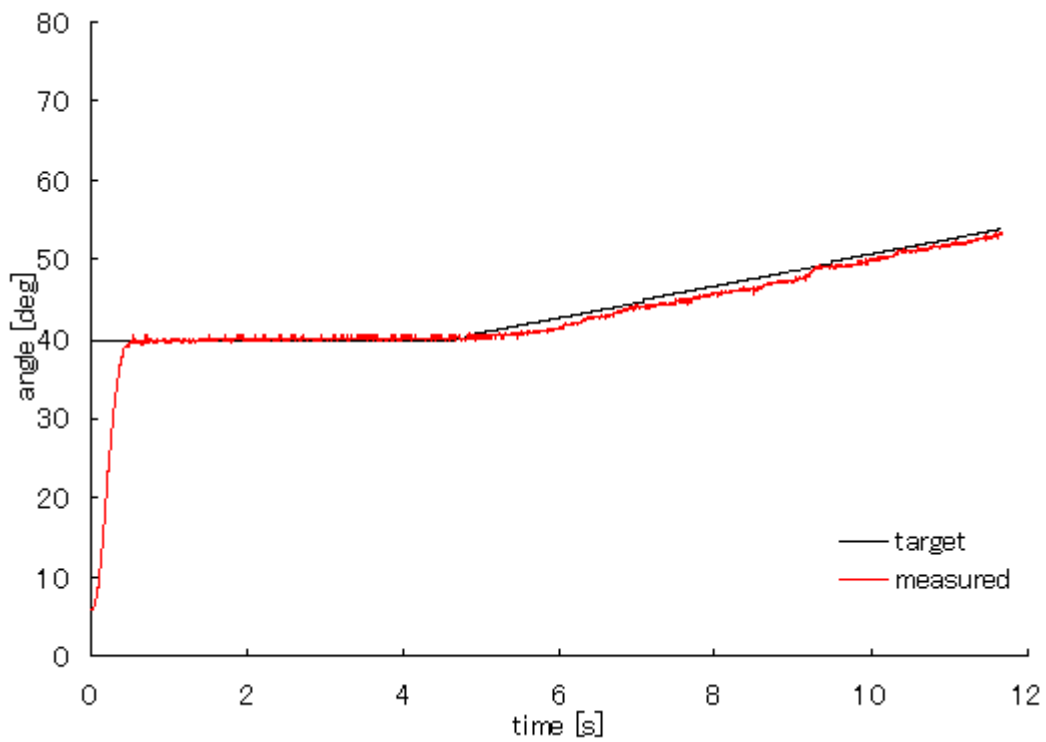


図 6.7 ランプ入力増加率 2.0[deg/s]における P+オフセット圧力制御の角度変化

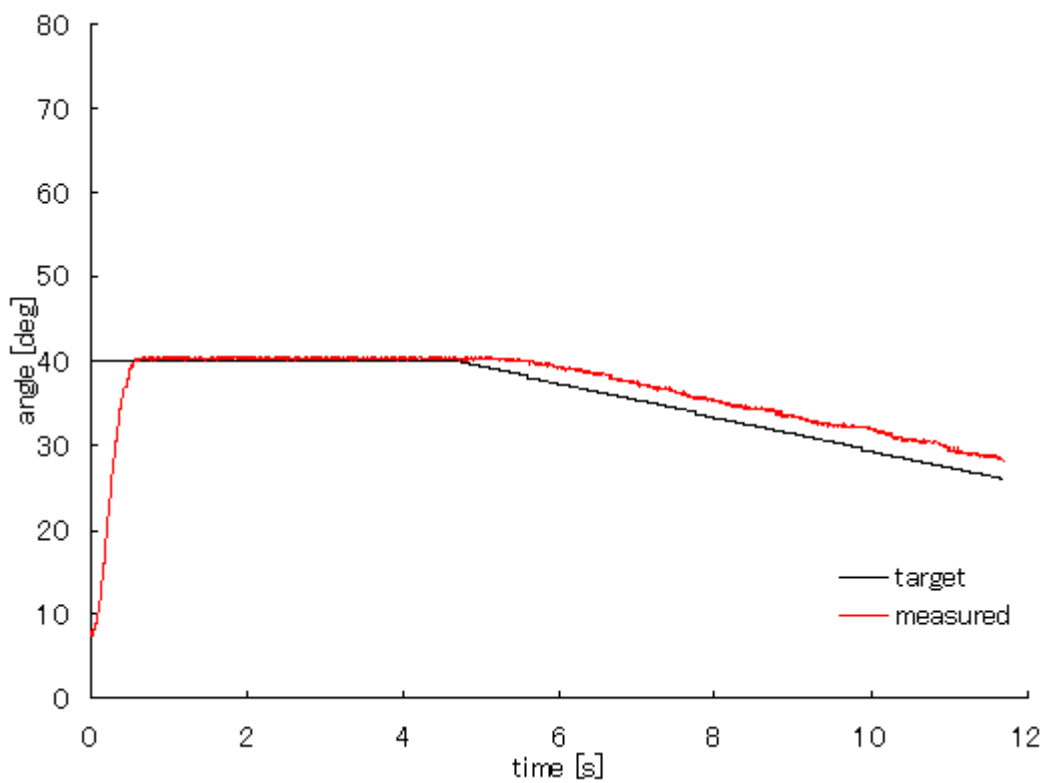


図 6.8 ランプ入力増加率-2.0[deg/s]における PD 制御の角度変化

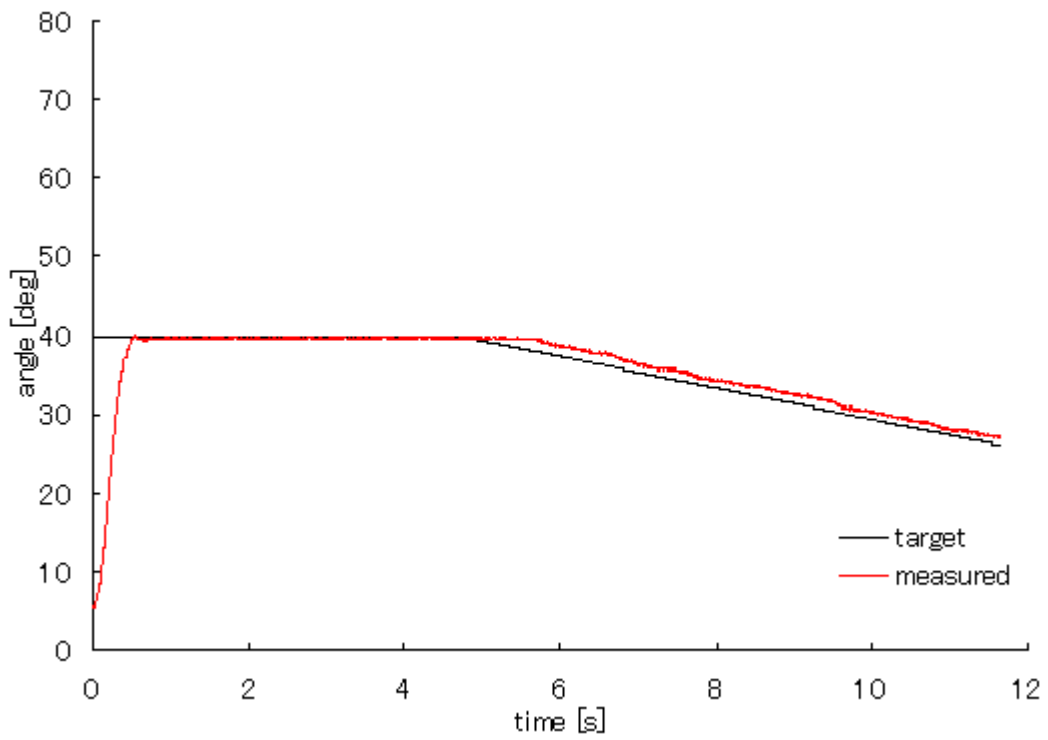


図 6.9 ランプ入力増加率-2.0[deg/s]における PID 制御の角度変化

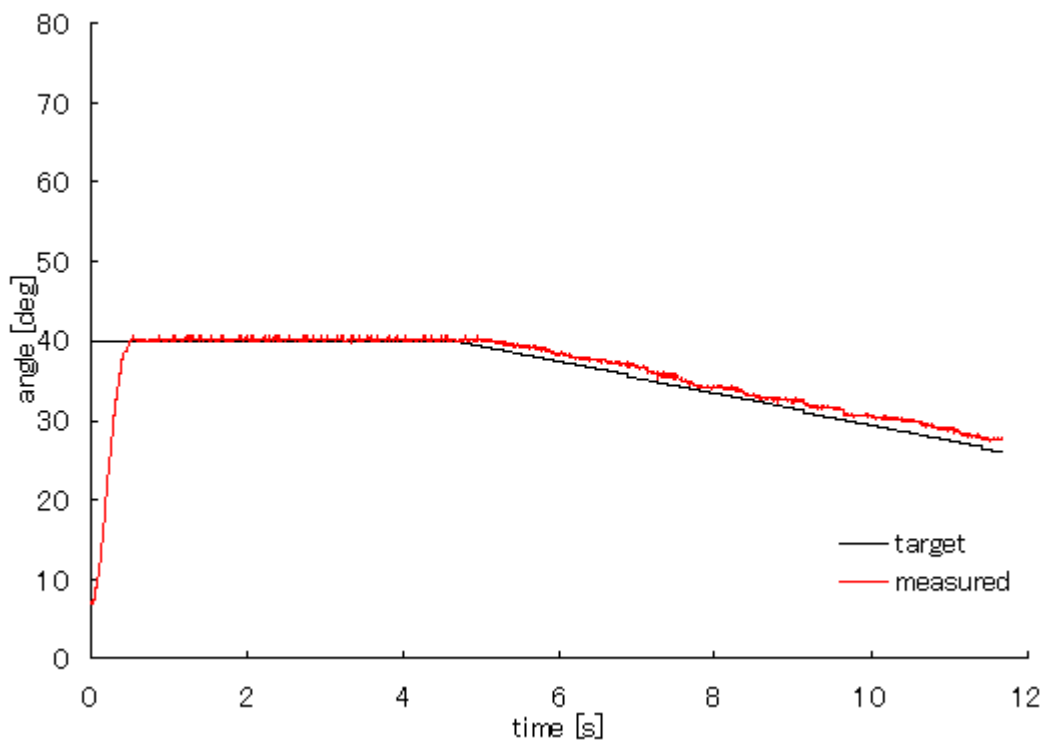


図 6.10 ランプ入力増加率-2.0[deg/s]における P+オフセット圧力制御の角度変化

表 6.1 PD 制御, PID 制御, P+オフセット圧力制御の比較 (ランプ入力 2.0[deg/s])

	オーバシユート [%]	立ち上がり時間 [ms]	ランプ入力目標値との 絶対値誤差[deg]
PD 制御	1.3	339	2.581
PID 制御	0.5	304	0.935
P+オフセット	0.7	284	0.861

表 6.2 PD 制御, PID 制御, P+オフセット圧力制御の比較 (ランプ入力-2.0[deg/s])

	オーバシユート [%]	立ち上がり時間 [ms]	ランプ入力目標値との 絶対値誤差[deg]
PD 制御	1.3	354	2.006
PID 制御	0.5	296	1.035
P+オフセット	0.7	280	1.066

6.4 PID 制御との追従性の比較

6.3 節において、PID 制御と本研究が提案する P+オフセット圧力制御のステップ入力とランプ入力に対する制御性能は、近いものであった。6.3 節の PID 制御の制御ゲインは、ステップ入力とランプ入力に対する出力がバランスよく得ることが可能となるような制御ゲインを決定した。しかし、この節は、前節とは異なった目標に対して最適となるような PID 制御の制御ゲインを定めた PID 制御と、本研究が提案する P+オフセット圧力制御の制御性能を比較する。PID 制御は、二次関数である $40+0.5t^2[\text{deg}]$ に対する追従性が、最も高くなるような制御ゲインを実験的に決定した。そのため、ステップ入力を与えた場合には、オーバシュートを発生する可能性が大いにある制御ゲインである。また、P+オフセット圧力制御の制御ゲインは、4.2 節の方法を用いて決定した。

入力をステップ入力と二次関数とした場合の結果が、図 6.11 と図 6.12 である。また、入力をステップ入力と正弦波($40+\sin 4t$) [deg]とした場合の結果が、図 6.13 と図 6.14 である。PID 制御は、二次関数の追従性が高くなるように、制御ゲインを決定しているため、図 6.11 のように、二次関数に対して、誤差が少なく追従している。しかしながら、ステップ入力部分に関して、目標値に対して 10[deg]のオーバシュートを発生している。P+オフセット圧力制御は、二次関数に対して、誤差を生じながら追従し、ステップ入力に対しては、オーバシュートを 1.5[%]以下に制御できている。さらに、正弦波の入力に対しても、同様のことが言える。使用用途により、求められる性能が異なるため、一概にどちらの制御方法が良いとは言い切れないかもしれないが、筆者は、多少の追従性の誤差は生じるが、オーバシュートの発生が 1.5[%]以下と少なく安全であると言える、本研究が提案する P+オフセット圧力制御が良いと考える。

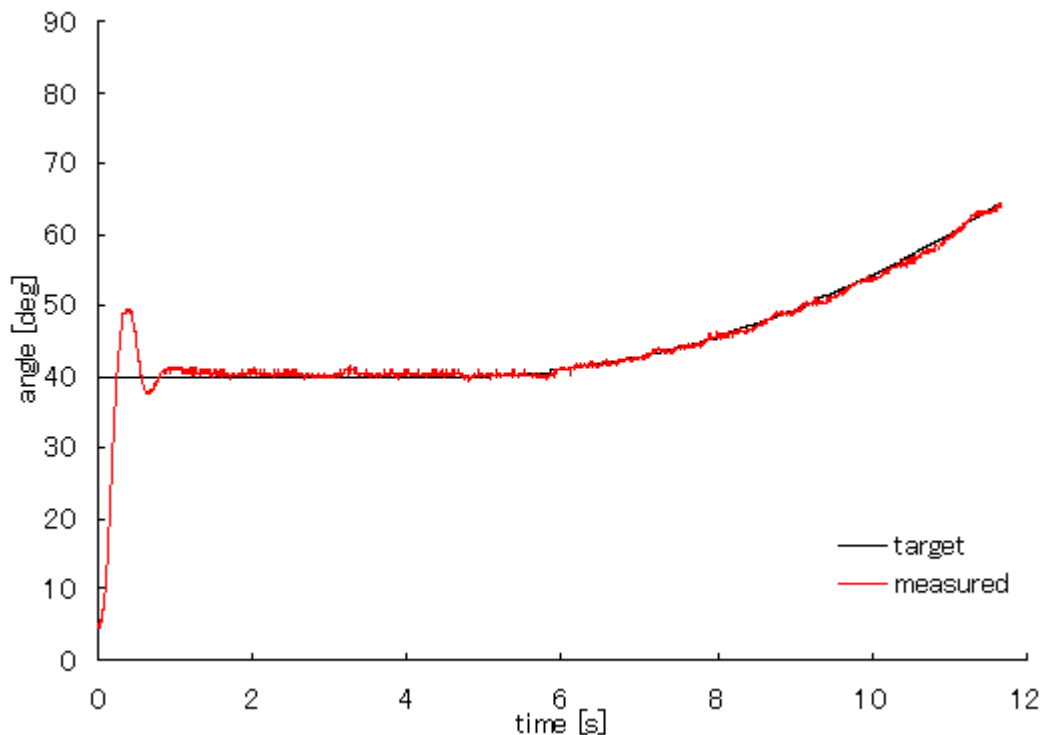


図 6.11 PID 制御 $40+0.5t^2$

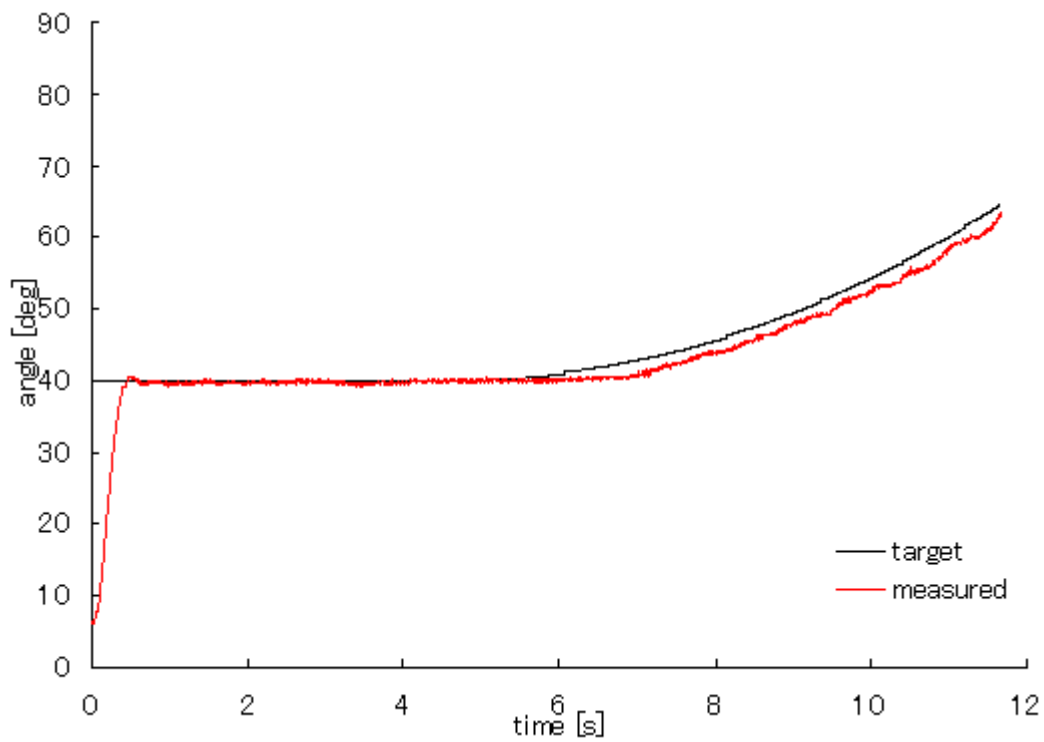


図 6.12 P+オフセット圧力制御 $40+0.5t^2$

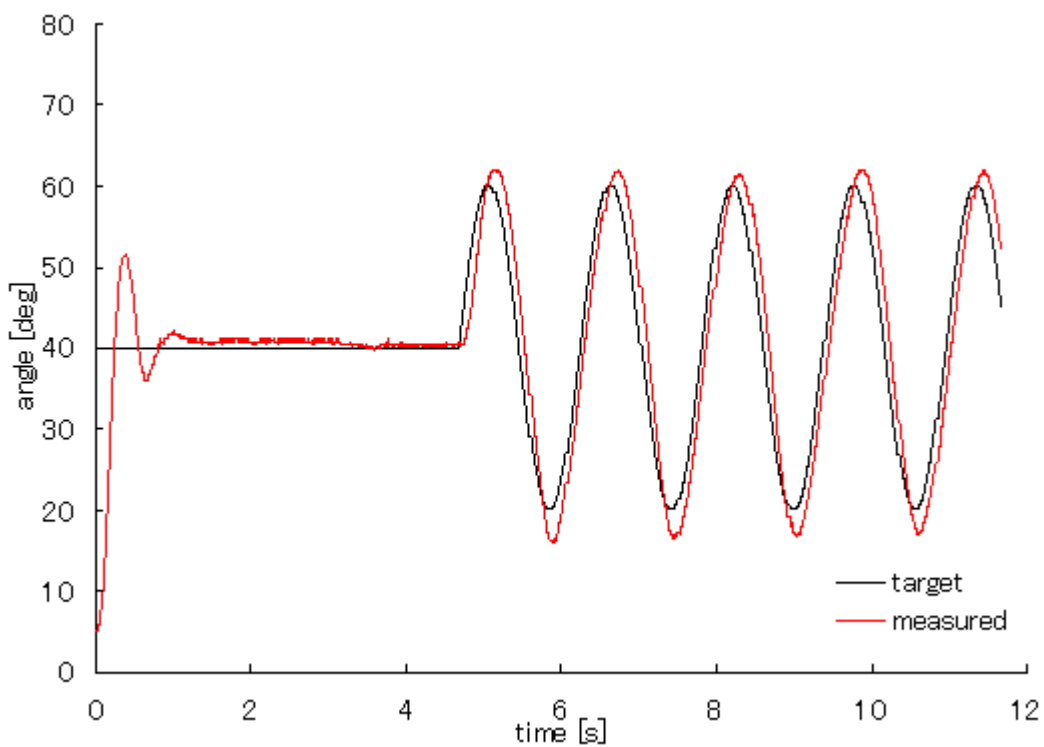


図 6.13 PID 制御 $40+\sin(4t)$

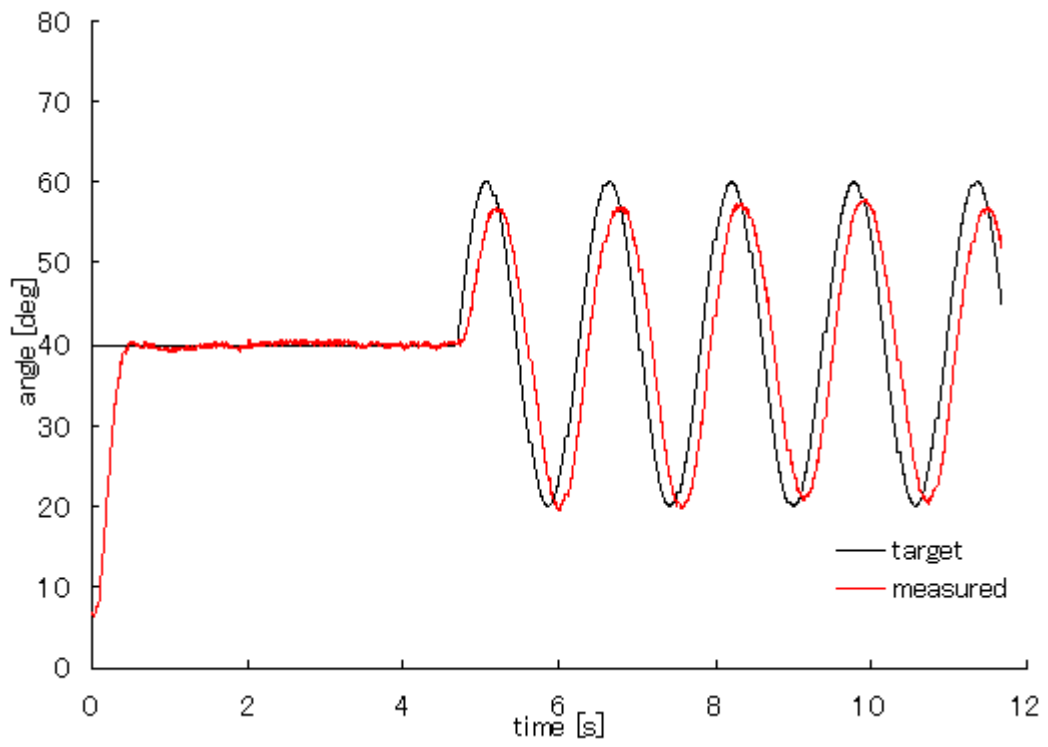


図 6.14 P+オフセット圧力制御 $40+\sin(4t)$

6.5 外乱による影響

現在、実験を行っている環境は、ロボットアームにとって、衝突する可能性のある物体が存在しない、環境である。この環境は、ロボットアームにとって、大変理想的な環境である。しかし、空気圧アクチュエータを搭載したロボットアームが普及し、一般家庭において活躍する可能性が発生した場合、一般家庭には、ロボットアームが衝突する可能性がある物体が多く存在する。例えば、空気圧アクチュエータを搭載したお手伝いロボットが、一般家庭で活躍する状況を考える。日常生活支援ロボットに、テーブルにあるお菓子等の対象物体をユーザの所まで、運んでもらう場合、日常生活支援ロボットは、テーブルにある対象物体を自らのアームで掴む動作を行う。この際、テーブルと腕が衝突する場合は、発生する可能性を秘めている。また、ロボットとユーザが突発的に衝突する可能性もゼロではない。これらの衝突は、ロボットにとっての外乱である。

そこで、本研究が提案する制御方法と、PID 制御において、外乱に対する制御性能の比較を行った。ロボットに与える外乱として、長時間の衝突を想定したステップ状の外乱と、短時間の衝突を想定したスパイク状の外乱の2種類を与えた。また、外乱の入力は、ロボットに対して、故障の原因となる可能性も秘めているため、実際の物体をロボットに衝突させることは、あまりにも危険が高い。そのため、ロボットアームにかかる負荷が少ないように、人間の手により、想定する外乱を入力した。

ステップ状の外乱を与え場合の角度変化が、図 6.15 と図 6.16 である。スパイク状の外乱を与え場合の角度変化が、図 6.17 と図 6.18 である。ステップ状の外乱を与えた場合、PID 制御は、外乱が除去されると、I 制御により蓄積させた積分値により、目標値を 10[deg]以上行き過ぎ、そこから時間とともに目標値へと収束しようとしている。そして、本研究が提案する P+オフセット圧力制御は、外乱が除去されると、そのまま目標値とへすぐに収束することが可能である。また、スパイク状の外乱を与えた場合、PID 制御は、外乱の入力を重ねるごとに、外乱を除去した際に目標値から 5[deg]程度行き過ぎる値まで行ってしまい、そこから目標値へと収束しようとする。そして、P+オフセット圧力制御は、外乱が除去されると、そのまま目標値とへすぐに収束する。このように、本研究が提案する P+オフセット圧力制御は、制御に I 制御を含まないため、ロボットアームが遭遇するような外乱に対して、強い制御である。そのため、本研究が提案する制御方法は、ロボットアームの制御に適した制御であると言えることが可能である。

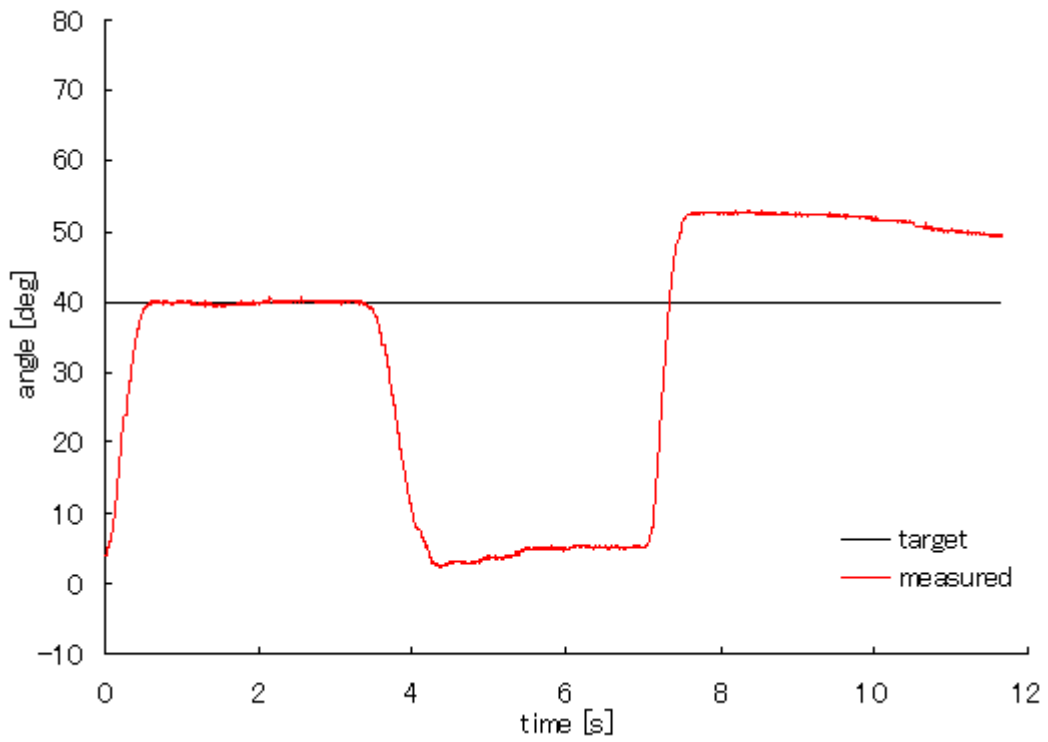


図 6.15 PID 制御に対するステップ状外乱

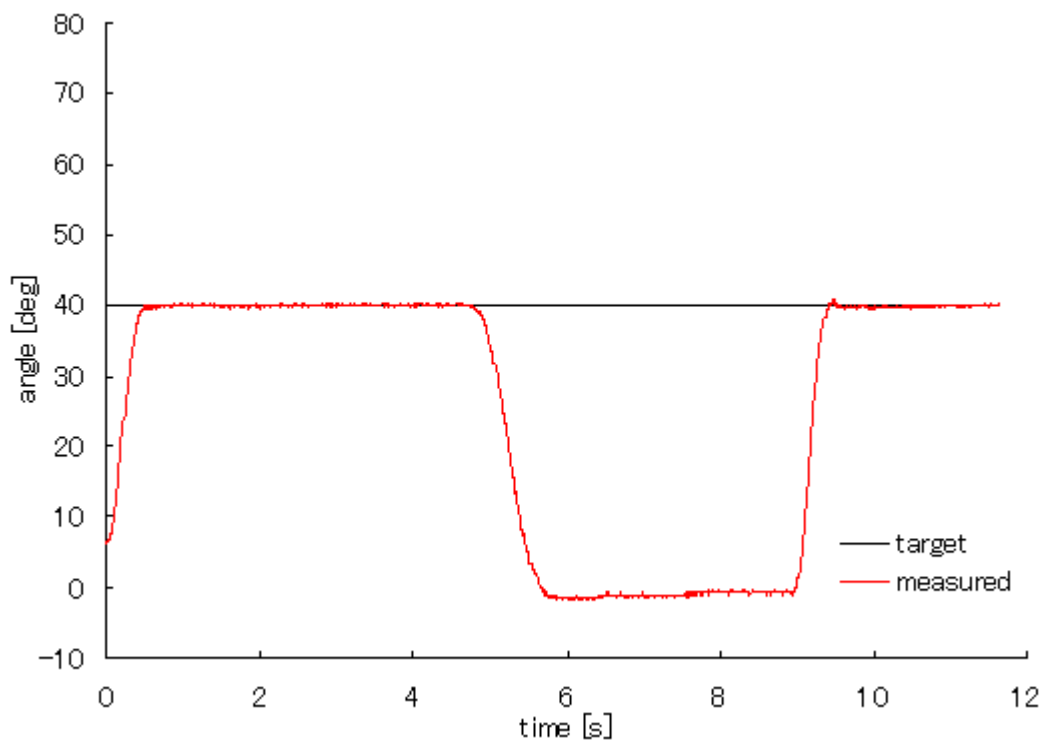


図 6.16 P+オフセット圧力制御に対するステップ状外乱

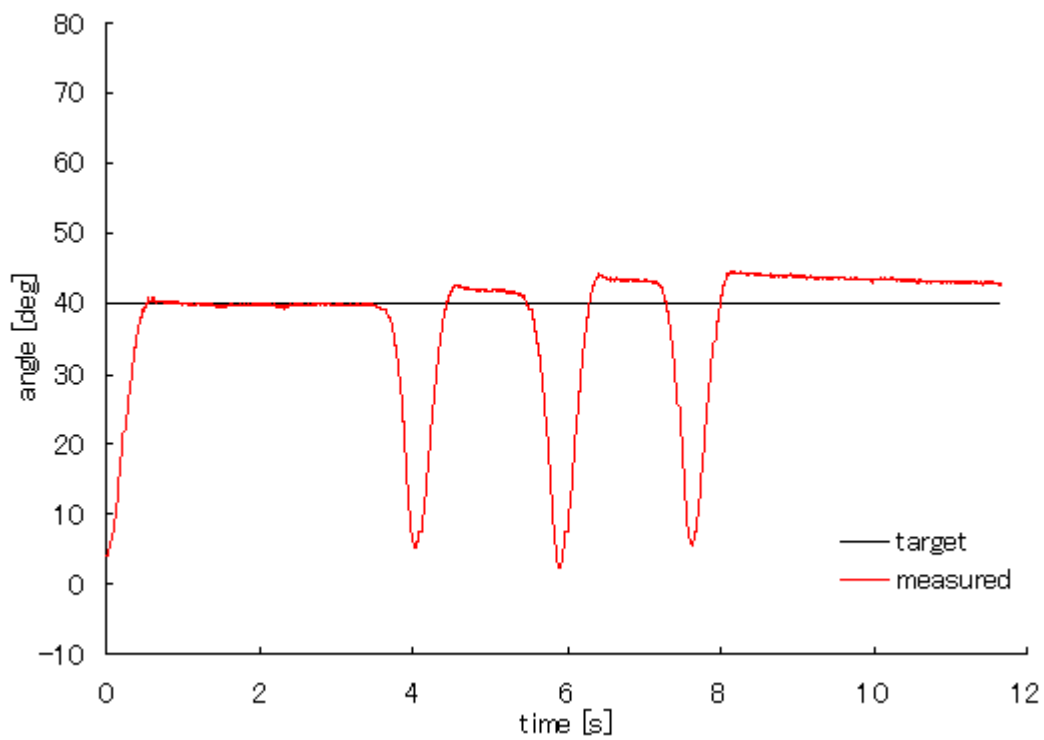


図 6.17 PID 制御に対するスパイク状外乱

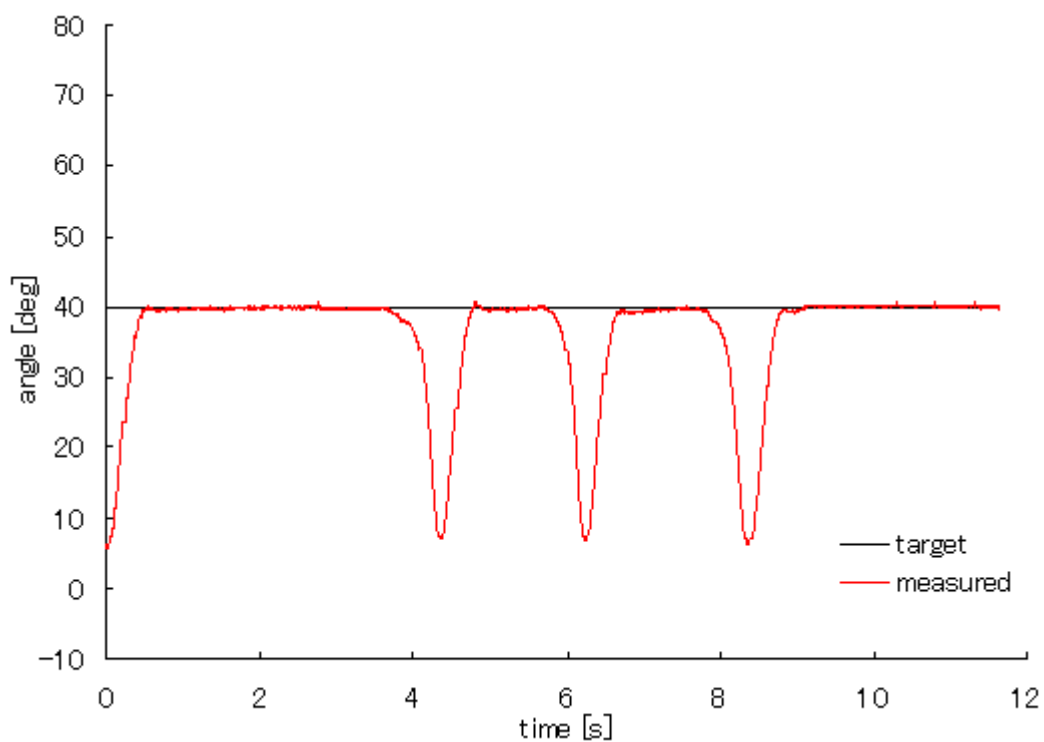


図 6.18 P+オフセット圧力制御に対するスパイク状外乱

第7章 まとめ

本研究は、空気圧アクチュエータの制御において、オフセット圧力を適切に調整することにより、少ないオーバーシュート、早い応答、高い追従性を実現することを目的とする。また、オフセット圧力の調整は、単純な原理を用いて、行うことを目的とする。

本研究は、エアシリンダのピストンに剛性を与えるオフセット圧力に、注目した。このオフセット圧力は、一般的な場合において、一定値として使用されてきた。この一定値であったオフセット圧力を次のような原理で変化させる方法を提案した。現在値と目標値が遠い場合には、推進側チャンバのオフセット圧力を上昇させ、抵抗側チャンバのオフセット圧力を低下させることで、抵抗側チャンバへピストンを動き易くする。現在値と目標値が近くなりオーバーシュートを発生する可能性がある場合には、推進側チャンバのオフセット圧力を低下させ、抵抗側チャンバのオフセット圧力を上昇させることで、抵抗側チャンバへピストンが動きにくくし、オーバーシュートを抑制する。目標値に収束している場合には、抵抗側チャンバ、推進側チャンバ共に、同じオフセット圧力を与える。この原理を、本研究では、D制御のみで実現した。そして、このオフセット圧力のD制御のみでは、アクチュエータを駆動させることは難しいため、推進側のみに圧力を供給するP制御をアクチュエータのメインに駆動させる制御として、使用した。そのため、本研究が提案した制御は、P制御とオフセット圧力のD制御から構成される制御である。

本研究が提案した制御における制御ゲインを決定する方法は、既存の方法が適さないため、実験的に制御ゲインを決定する方法を提案した。この方法を用いることにより、簡単な方法で、制御ゲインを決定することが可能である。また、基本オフセット圧力と制御ゲインには、次のような関係を言えることが可能である。一度定めた制御ゲインは、基本オフセット圧力を変化させても使用可能である。

PD制御, PID制御とのステップ入力とランプ入力を与えた場合の評価実験を行った。結果、ランプ入力の増加率 $2.0[\text{deg/s}]$ の場合において、立ち上がり時間に関して、PD制御 $339[\text{ms}]$, PID制御 $304[\text{ms}]$, 本研究提案制御 $284[\text{ms}]$, と本研究が提案した制御方法が一番早い結果を得ることができた。ランプ入力の増加率が $2.0[\text{deg/s}]$ の場合、目標値と現在値との絶対値誤差が、PD制御は $2.581[\text{deg}]$, P+オフセット圧力制御は $0.861[\text{deg}]$ であり、P+オフセット圧力制御がPD制御と比較し、2倍以上に追従性を向上することができた。また、PID制御と比較すると、同程度の精度であった。しかし、本研究が提案した制御方法と同程度の精度であるPID制御であるが、I制御を含んでいるために、ある弱点を秘めている。その弱点とは、アクチュエータが目標値に収束する際に、障害物に対する衝突等により、目標値に収束できないという外乱の入力である。このような外乱が入力されて、取り除かれた後、PID制御は、I制御によって蓄積された積分値により、目標値を $10[\text{deg}]$ 以上行き過ぎてしまう、ある種の暴走を引き起こす可能性を秘めている。本研究が提案した制御方法は、このような外乱に対して、影響を受ける制御要素を含んでいないため、暴走することがない。そのため、本研究が提案した制御方法は、空気圧アクチュエータがロボットのアクチュエータとして使用された際に、最適な制御方法である。

以上のことから、本研究において提案した制御方法は、有用であることを示し、今後の空気圧アクチュエータの可能性を広げることができた。

謝辞

本論文を作成するにあたり，日頃からの確な指摘を頂いた本学システム情報系 星野聖 教授に深く感謝の意を表します．そして，気分転換のための研究室行事に参加して頂いた医用生体工学研究室の方々に深く感謝いたします．最後に研究生活，大学院生活を経済的に支えてくださった両親に深く感謝いたします．

参考文献

- [1] 小林宏, 鈴木秀俊, 伊庭雅弥, 長谷川翔, “上肢動作補助用マッスルスーツの肩機構開発と姿勢制御手法の提案,” 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.4, pp.376-385, 2006.
- [2] 只野耕太郎, 住野亘, 川嶋健嗣, “空気圧駆動を用いた力覚提示機能を有する多自由度鉗子の開発,” 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.5, pp.538-545, 2009.
- [3] 古藪陽太, 川渕一郎, 星野 聖, “エアシリンダを内骨格とするヒト型ロボットアームの制御,” 電子情報通信学会論文誌, A, vol.J88-A, no.11, pp.1318-1325, 2005.
- [4] クリシャンタ ベラガラ ドン ガヤン, 星野 聖, “バイアス圧力を利用した空気圧式ヒューマノイドロボットアーム制御,” 電子情報通信学会技術研究報告, HIP, ヒューマン情報処理, 108(27), pp.85-90, 2008.
- [5] 星野 聖, ベラガラ ドン ガヤン クリシャンタ: アクチュエータ, PCT/JP2009/58619, 出願日 2009年5月7日
- [6] K.Hoshino and I.Kawabuchi, “Mechanism of humanoid robot arm with 7 DOFs having pneumatic actuators,” IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, E89-A, 11, pp.3290-3297, 2006.
- [7] 北森俊之, “PID 制御システムの設計論,” 計測制御, vol.19, no.4, pp382-391, 1980.

論文リスト

【査読付き学術論文】

- [1] N.Igo and K.Hoshino, "Control of Pneumatic Robots Using Variable Offset Pressure Controller," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.6, pp.1024-1030, 2011/12.

【国際会議論文】

- [1] N.Igo and K.Hoshino, "Small Optical Tactile Sensor for Robots," 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2012), MP1-B.3, pp.746-751, Kyushu University, 2012/12.
- [2] N.Igo and K.Hoshino, "Control of Offset Pressure for Pneumatic Robots," 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, C2-2, pp.428-433, Kyoto University, 2011/12.
- [3] N.Igo and K.Hoshino, "Variable offset pressure controller for air cylinder actuator," 5th International Conference on the Advanced Mechatronics, 5, 1B3-1, pp.135-140, Osaka University, 2010/10.
- [4] N.Igo and K.Hoshino, "Variable offset pressure control for pneumatic actuators," 2010 International Symposium on Intelligent Systems, S4-7-4, pp.1-6, Tokyo Metropolitan University, 2010/09.