

環境との摩擦を考慮した回転リンク系の
姿勢制御に関する研究

**Study on Posture Control of Rotating Link Systems
under Friction Condition**

2016年3月

瀬戸山 康之

SETOYAMA Yasuyuki

目次

第1章 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 回転リンク系の姿勢制御問題	1
1.3 本研究の目的	3
1.4 本論文の構成	4
第2章 水面上に浮かぶ小型浮遊機械の姿勢制御	6
2.1 水面上に浮かぶ浮遊機械	6
2.2 トルクユニット	7
2.3 小型浮遊機械の数学モデル	8
2.4 小型浮遊機械の姿勢制御問題	10
2.4.1 粘性摩擦が姿勢制御に及ぼす影響	10
2.4.2 アンローディングの問題と初期姿勢への収束	17
2.5 粘性摩擦を利用した姿勢制御法	20
2.5.1 機体が目標姿勢に収束するための条件	20
2.5.2 機体が初期姿勢に戻る条件	21
2.5.3 アンローディングにおける物理パラメータの影響	22
2.5.4 小型浮遊機械の制御アルゴリズム	24
2.5.5 目標とするリアクションホイールの角速度と機体の姿勢角度	26
2.5.6 提案手法を用いた数値シミュレーション	27
2.6 提案手法の特徴	29
2.6.1 機体の慣性モーメントの影響	29
2.6.2 状態フィードバック制御を利用した応答性の変化	31
2.7 検証モデルの製作	33
2.7.1 機体	33
2.7.2 トルクユニット	34
2.7.3 粘性抵抗可変機構	35

2.7.4	制御基板	38
2.8	提案手法の実現可能性の確認	42
2.8.1	実験環境	42
2.8.2	HALCONを用いた画像処理	43
2.8.3	粘性摩擦可変機構を用いた機体の姿勢変化	44
2.8.4	トルクユニットの指令電圧と機体の姿勢角度の関係	46
2.8.5	実験結果	49
第3章	1リンクTUMの姿勢制御	51
3.1	トルクユニットマニピュレータ (TUM)	51
3.2	1リンクTUMの数学モデル	52
3.3	1リンクTUMの姿勢制御問題	54
3.4	提案手法を用いた1リンクTUMの姿勢制御	59
3.4.1	1リンクTUMの制御アルゴリズム	59
3.4.2	リンクの慣性モーメントの影響	63
3.4.3	状態フィードバック制御を用いた場合の応答性の変化	64
3.4.4	姿勢制御で消費されるエネルギー	66
3.5	実験装置	70
3.5.1	実験装置概要	70
3.5.2	システム構成	71
3.6	検証実験	72
3.6.1	粘性摩擦の切り替えによる姿勢変化の確認	72
3.6.2	トルクユニットの指令電圧とリンクの姿勢角度の関係	72
3.6.3	提案手法を適用した実験の結果	75
第4章	2リンクTUMの姿勢制御	77
4.1	2リンクTUMの数学モデル	77
4.2	2リンクTUMの姿勢制御問題	80
4.3	リンクの目標姿勢への制御方策	86
4.3.1	粘性摩擦を利用したリンク1の姿勢制御	86
4.3.2	RWの角運動量を利用したリンク2の姿勢制御	88
4.3.3	リンク2を目標姿勢へ収束させる条件	90
4.3.4	周期入力を用いたリンク2の姿勢変化	91

4.4	2リンクTUMの姿勢制御法の提案	95
4.4.1	2リンクTUMの制御アルゴリズム	95
4.4.2	提案手法の実施可能性の確認	96
4.5	提案手法の制御特性の考察	99
4.5.1	RWの周期運動とリンクの周期運動の関係	99
4.5.2	リンク1の揺動がリンク2の姿勢制御に与える影響	102
4.5.3	周期入力の周期と周波数を変えた場合	104
4.5.4	リンクの質量と慣性モーメントを変えた場合	112
4.5.5	状態フィードバック制御を用いた場合の応答性	120
4.5.6	提案手法を用いた姿勢制御における応答性向上の一例	122
第5章 結言		126
謝辞		133

目 次

1.1	Vertical articulated robot	2
1.2	Horizontal articulated robot	2
2.1	Example of water floating robot	6
2.2	Principles of torque unit	7
2.3	The model of water floating robot	8
2.4	Pattern 1 ($c_1 \neq 0, c_2 \neq 0$)	13
2.5	Pattern 2 ($c_1 = 0, c_2 \neq 0$)	14
2.6	Pattern 3 ($c_1 \neq 0, c_2 = 0$)	15
2.7	Pattern 4 ($c_1 = 0, c_2 = 0$)	16
2.8	Simulation result after control off (water floating robot)	19
2.9	Simulation result for change of physical parameters	23
2.10	Manifolds for the control method with water floating robot	25
2.11	Simulation result for the proposed method (water floating robot)	28
2.12	Simulation result by changing moment of inertia of the body	30
2.13	Simulation result with state feedback control (water floating robot)	32
2.14	Experimental model of water floating robot	33
2.15	Torque Unit	34
2.16	Variable structure fins	35
2.17	Variable Viscous Drag Mechanism	36
2.18	Variable Viscous Drag Mechanism	36
2.19	Transformable fins of the experimental model	37
2.20	System structure	38
2.21	Control Unit	38
2.22	Switch Circuit	39
2.23	PIC16F877A	40
2.24	H Bridge Circuit	41

2.25	The experimental environment	42
2.26	LED	43
2.27	Step response with $u=-3.0$ [V]	45
2.28	Step response with $u=-2.0$ [V]	48
2.29	Manifolds for the control experiment of water floating robot	49
2.30	Flow chart of posture control	50
2.31	Control experiment with the proposed method of water floating robot	50
3.1	Torque Unit Manipulator (TUM)	51
3.2	The model of 1-link TUM	52
3.3	Simulation result with state feedback control (1-link TUM)	56
3.4	Simulation result after control off (1-link TUM)	58
3.5	Manifolds for the control method of 1-link TUM	59
3.6	Simulation result with control method of 1-link TUM	62
3.7	Simulation result with state feedback control (1-link TUM)	65
3.8	Energy consumption with $Ja=0.0038$	68
3.9	Energy consumption with $Ja=0.076$	69
3.10	Experimental model of 1-link TUM	70
3.11	System structure of 1-link TUM	71
3.12	Step response with $u= 1.0$ [V]	74
3.13	Step response with $u= 0.8$ [V]	74
3.14	Manifolds for the control experiment of 1-link TUM	76
3.15	Control experiment with the proposed method of 1-link TUM	76
4.1	2-Link TUM	78
4.2	Simulation result with a nonlinear feedback control	82
4.3	Simulation result after control off (2-link TUM)	85
4.4	Manifolds for the control method of the first link	86
4.5	Simulation result with different torque	89
4.6	Simulation result with a cycle input	93
4.7	Simulation result with the proposed control method of 2-link TUM	98
4.8	Simulation result with torque of RW1	100
4.9	Simulation result with torque of RW2	101
4.10	Influence of oscillation of the first link	103

4.11	Simulation result with $A=0.8$	106
4.12	Simulation result with $A=1.2$	107
4.13	Simulation result with $A=2.0$	108
4.14	Simulation result with $B=0.8$	109
4.15	Simulation result with $B=1.2$	110
4.16	Simulation result with $B=2.0$	111
4.17	Simulation result with $m_{a1}=1.0, J_{a1}=0.02$	114
4.18	Simulation result with $m_{a1}=2.5, J_{a1}=0.05$	115
4.19	Simulation result with $m_{a1}=5.0, J_{a1}=0.1$	116
4.20	Simulation result with $m_{a2}=1.0, J_{a2}=0.02$	117
4.21	Simulation result with $m_{a2}=2.5, J_{a2}=0.05$	118
4.22	Simulation result with $m_{a2}=5.0, J_{a2}=0.1$	119
4.23	Simulation result with state feedback control (2-link TUM)	121
4.24	Improve the control response	125

表 目 次

2.1	Physical parameters for the water floating robot	10
2.2	Physical parameters for the water floating robot in the simulation	27
2.3	Spec of DC Micro Motor	34
2.4	Spec of DC Motor	35
2.5	Spec of the PIC16F877A	40
3.1	Physical parameters of 1-link TUM	54
4.1	Physical parameters for 2-link TUM	80
4.2	Physical parameters of the link2	103

第1章 緒言

1.1 研究背景

近年，産業の発達により，生産現場での作業は人の手からロボットによる自動化に変わってきている．生産現場の作業を行うロボットは，産業用ロボットと呼ばれ，その中でも多関節ロボットと呼ばれるロボットマニピュレータは，様々な場面で使用されている．多関節ロボットは，その動きによって，垂直多関節ロボットと水平多関節ロボットに分別することができる．垂直多関節ロボットは，三次元空間を自由に動くことができ，複雑な動きに対応することができるといった利点を持つ．しかし，機械剛性が低く，三次元的に動くため座標変換が複雑になる，高速に動かすとオーバーシュートや振動が起きたりするといった点から，高い制御技術が必要となる．水平多関節ロボットは，手先以外の関節の動きが水平面内の運動であることから，軌道を計画しやすく，制御が容易であるといった特徴を有する．図.1.1に垂直多関節ロボットの一例を，図.1.2に水平多関節ロボットの一例を載せる．

ロボットマニピュレータでは通常，各関節に一つのアクチュエータが存在し，所望の運動を実現している．しかし，近年は，マニピュレータの軽量化、省エネルギー化，低コスト化を目的として，システムの自由度よりもアクチュエータの数が少ない劣駆動系と呼ばれるマニピュレータの研究が盛んに行われている．その中でも，構造が単純で，力学的な解析が容易であることから，関節がすべて回り対偶で拘束されている回転リンクマニピュレータに関する研究がこれまでに多くされている．

1.2 回転リンク系の姿勢制御問題

非駆動関節を有する回転リンク系の様々な姿勢制御問題に対して，これまで多くの手法が提案されている．ベースに近い第1関節を駆動，第2関節を非駆動とする平面2リンクマニピュレータの姿勢制御問題では，非駆動関節にブレーキを用いて完全に固定する手法が提案されている [7][8]．また，第1関節と第2関節が駆動で第3関節が非駆動になっている平面3リンクマニピュレータでは，任意の初期状態から目標状



Fig. 1.1: Vertical articulated robot



Fig. 1.2: Horizontal articulated robot

態に制御するためのリンクの目標軌道を生成する手法が提案されている [9][10]. 他にも第1関節を駆動, 第2関節と第3関節を非駆動とする平面3リンクマニピュレータにおいて, 非駆動関節の摩擦の影響を考慮し, その摩擦を利用した制御手法が提案されている [11][12]. これらの研究では, 第1関節が駆動関節になっているので, 姿勢制御が可能となっている.

ところで, 第1関節が駆動関節でない場合, 非駆動関節を有する系は姿勢を制御することが困難となる [13][14]. 第1関節が非駆動となってい平面回転リンクマニピュレータの姿勢制御問題に対して, リアクションホイールや慣性ロータなどのリンクに直接トルクを発生させる装置を用いる方法について報告されている [15]-[19]. し

しかし、これらの研究では、非駆動関節に生じる摩擦の影響が考慮されていない。そのため、提案されている制御手法は、数値シミュレーション上でうまくいったとしても、実システムを用いた制御手法の検証実験を行うと、無視した摩擦の影響でエネルギーの散逸が起こり、トルクユニット内のリアクションホイールや慣性ロータに角運動量が残留する問題が生じる。そのため、この角運動量の残留を解消（アンローディング）するための方法を考えることが重要になる。この問題を避けるために、非駆動関節に発生する静止摩擦力を越えない範囲での制御トルクを用いて、角運動量の残留を解消する方法が提案されている [20]。しかし、非駆動関節の静止摩擦力を越える制御トルクを利用できないため、静止状態に収束するまで時間がかかるという問題がある。

1.3 本研究の目的

本研究では、環境から受ける粘性摩擦の影響を考慮した回転リンク系を対象に、トルクユニットを用いた姿勢制御法について検討する。回転リンク系の関節には、静止摩擦などの影響を低減するために潤滑油などを使うのが一般的である。そのため、粘性摩擦が回転リンク系の姿勢制御に及ぼす影響を解析することは重要となる。ここでトルクユニットとは、リアクションホイールとこれを駆動するモータからなる装置であり、非駆動関節を持つ回転リンク系の任意の位置に装着することで、リンクに直接トルクを与えて姿勢制御の制御を行うことができる。しかし、前述したように、環境から受ける粘性摩擦の影響を考慮した場合、これまでに提案されている手法では、実システムを用いた制御手法の検証実験を行うと、トルクユニット内のリアクションホイールに角運動量が残留する問題が起こり、制御目的を達成することが困難となる。そのため、粘性摩擦がリンクの姿勢制御に与える影響を考慮した上で制御手法を考える必要がある。そこで本論文では、リアクションホイールに残留する角運動量と環境から受ける粘性摩擦を姿勢制御に積極的に利用することでこの問題を解決する制御手法を提案する。

1.4 本論文の構成

以下に本論文の構成を述べる。

第1章は、これまでに行われてきた回転リンク系の姿勢制御に関する研究についてまとめた。まず、これまでに行われてきた回転リンク系の姿勢制御に関する研究のうち、平面回転リンク系の姿勢制御に関するものについていくつか例を挙げた。平面回転リンク系の姿勢制御において、環境と第1リンクが駆動関節で繋がっている場合、系は可制御となることが分かっている。しかし、環境と第1リンクが非駆動となっている場合、系の姿勢を制御することが困難となる。このような系を制御するために、トルクユニットや慣性ロータなどのリンクに直接トルクを与える装置を用いる方法が考えられているが、これまでの研究では、環境から受ける摩擦の影響を考慮していなかった。この考慮していない摩擦、特に粘性摩擦の影響が回転リンク系の姿勢制御に与える影響について述べて、本研究の意義と目的を記述した。

第2章は、水上に浮かぶ小型浮遊機械の姿勢制御問題について検討する。水からの粘性摩擦の影響を受ける浮遊機械の場合、トルクユニットを用いて姿勢制御を行うと、定常状態になった時にトルクユニットのリアクションホイールに一定の角運動量が残留し、またさらに、その定常上状態でトルクユニットの駆動力を零にすると、リアクションホイールの回転は止まる一方で、浮遊機械は姿勢制御を行う直前の初期姿勢に戻る現象が生じる。そこで、まずこの現象について数値シミュレーションで確認し、その原理を明らかにする。次に、この問題を解決するための一つの手段として、リアクションホイールが一定の角速度で回転して定常状態になっているときに、浮遊機械が水から受ける粘性摩擦の大きさを変更する機構を利用することで、リアクションホイールに蓄えられている運動エネルギーを浮遊機械の姿勢制御に利用する手法を提案する [21][22]。そして、提案手法の検証実験により、提案手法の実施可能性を確認する。

第3章は、非駆動関節を有する平面1リンクマニピュレータにトルクユニットを1機取り付けられた系を対象に、その姿勢制御問題について検討する。このような系は、関節にモータを取り付けている一般的なマニピュレータのように状態フィードバック制御によってリンクを任意の目標姿勢に制御しようとするすると、リンクは目標姿勢に対して定常誤差を生じ、リアクションホイールに一定の角運動量が残留する。この角運動量の残留を解消するための方法として、第2章で提案した制御手法を応用し、検証実験により提案手法の実施可能性を示す [23]-[25]。

第4章は、全ての関節が非駆動な平面2リンクマニピュレータの各リンクにトル

クユニットが1機ずつ取り付けられている系を対象に，その姿勢制御問題について検討する．まず，それぞれのリンクを任意の目標姿勢に制御するために，簡単な非線形状態フィードバック制御を適用した場合のリンクの回転角度とリアクションホイールの角速度を数値シミュレーションにより確認する．そして，定常状態におけるリンクの回転角度とリアクションホイールの角速度の関係を考察する．次に，制御手法を考える上での第一段階として，第2リンクの姿勢を無視して，第1リンクの姿勢のみ目標姿勢に制御することを試みる．第1リンクの姿勢は，第1リンクの回転軸に働く粘性摩擦を可変にすることで目標姿勢に制御することが可能であることを示す．さらに，第2リンクを第2リンクの上にあるトルクユニットのリアクションホイールの角運動量を利用して目標姿勢に制御することを試みる．そして，これらの考えを発展させて，第1リンクと第2リンクの両方を任意の初期姿勢から目標姿勢に制御する手法を提案し，数値シミュレーションにより提案手法の有用性を確認する [26][27]．

第5章は，第2章から第4章で示した研究の内容を総括し，今後の課題や展望について述べる．そして，第1章で述べた環境との摩擦を考慮した回転リンク系の姿勢制御問題の解決法の一つとして，本研究を位置づける．

第2章 水面上に浮かぶ小型浮遊機械の姿勢制御

以下では、水面上に浮遊する小型機械の姿勢制御問題を考える。トルクユニットで駆動する小型浮遊機械は、並進運動を考慮せずに回転運動についてのみ考える場合、水からの粘性抵抗を受ける回転リンク系と見なすことができる。

2.1 水面上に浮かぶ浮遊機械

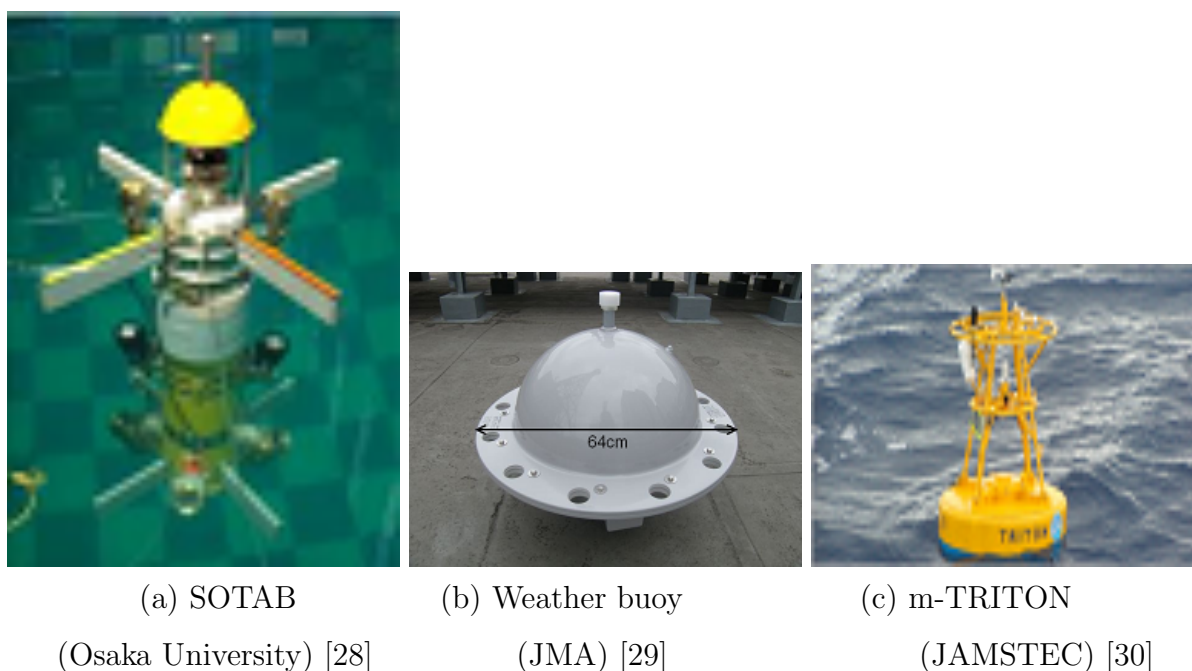


Fig. 2.1: Example of water floating robot

海面に浮遊して観測を行う海洋気象ブイや、深海で調査活動を行う水中ロボットは、陸上で活動する移動機械とは異なり、環境から受ける拘束力を利用して機体の姿勢を維持することが難しい(図2.1参照)。特に、機体に運動機構を搭載しているものは、その運動の反力によって姿勢が乱されやすい。しかし、観測・調査活動を行う浮遊機械には、調査対象の方向にカメラ等のセンサを向けたり、送受信データの電

波が届く方向にアンテナを向けたりする機能が要求される。このような浮遊機械の姿勢を制御する問題は重要な課題となっており、これまでもリアクションホイールを利用する方法が検討されている [31].

本章では、以下に述べるトルクユニットで駆動する小型浮遊機械のモデルに対して、環境から受ける粘性摩擦の影響が小型浮遊機械の姿勢制御に及ぼす影響について数値シミュレーションにより確認する。そして、粘性摩擦を積極的に利用した制御手法を提案し、実験モデルにより提案手法の実施可能性を検討した結果について述べる。

2.2 トルクユニット

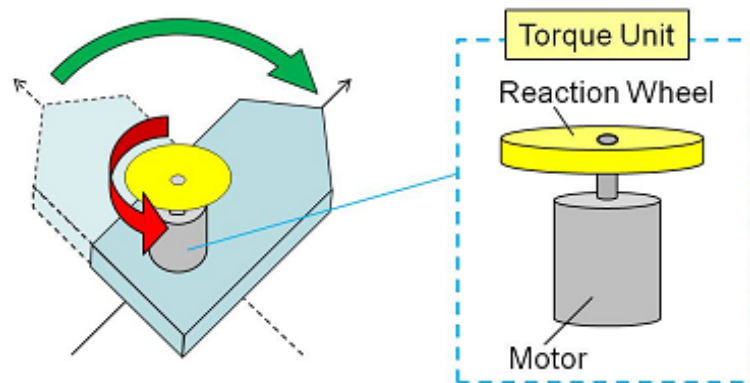


Fig. 2.2: Principles of torque unit

トルクユニットとは、図2.2に示すようにリアクションホイールとこれを駆動するモータから構成されるモジュールのことであり、非駆動関節を有する回転リンク系の任意の部位に装着することで、リンクの姿勢を制御するアクチュエータとして利用できる。これは、トルクユニット内のリアクションホイールをモータで回転させ、その回転によって生じた反作用のトルクを利用して、リンクの姿勢を制御している。トルクユニットを用いた姿勢制御は、しばしば人工衛星などの宇宙機械に対する姿勢制御装置として利用される。本研究では、回転リンク系の姿勢制御装置としてトルクユニットを用いる方法について検討していく。

2.3 小型浮遊機械の数学モデル

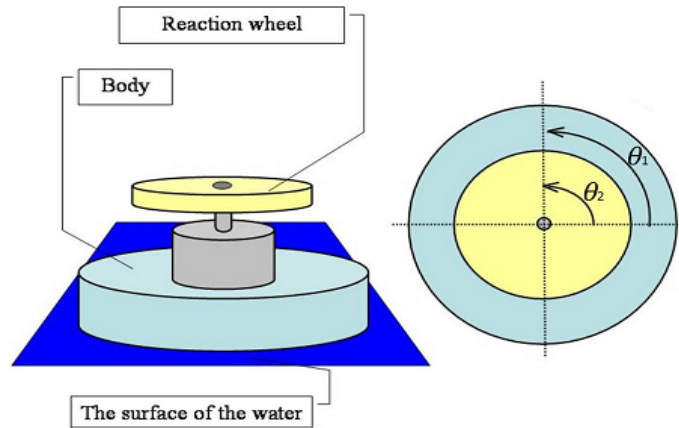


Fig. 2.3: The model of water floating robot

姿勢制御を行う小型浮遊機械のモデルとして、図2.3に示すような簡単な構造をしたシステムを考える。水面を浮遊するこの制御対象のモデルは、上下2つの部位から構成されており、それぞれ重心を通る鉛直な軸に対称な形状をしている。これら2つの部位は、重心を通る軸に回転対偶で拘束されており、関節には駆動モータが取り付けられている。すなわち、駆動モータを介して両者は相対運動を行う。以下では、上部をリアクションホイールと呼び、下部を姿勢制御の対象である機体と呼ぶ。簡単のため、水面と接している部位は下部の機体のみであり、機体が回転する際には水面から一様な粘性抵抗を受けるものとする。

機体の絶対座標系に対する回転角度を θ_1 、機体の慣性モーメントの値を J とする。リアクションホイールの相対座標系に対する回転角度を θ_2 、リアクションホイールの慣性モーメントの値を J_d とする。機体が回転する際に水面から受ける抵抗の粘性摩擦係数を c_1 とする。また、リアクションホイールと機体の相対回転運動には一様な粘性抵抗が働くものとし、その粘性摩擦係数を c_2 とする。以上の仮定のもと、モータの駆動トルクを τ とすると、モデルの状態方程式は次のように表わせる。

$$\dot{x} = Ax + B\tau \quad (2.1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -c_1/J & c_2/J \\ 0 & 0 & c_1/J & -c_2(J + J_d)/JJ_d \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1/J & (J + J_d)/JJ_d \end{bmatrix}^T \quad (2.3)$$

ここで, $x = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2]^T$ である.

Table 2.1: Physical parameters for the water floating robot

Parameter	Symbol	value
The mass of the body	m	0.5[kg]
The mass of the reaction wheel	m_d	0.2[kg]
The moment of inertia of the body	J	0.01[kgm ²]
The moment of inertia of the reaction wheel	J_d	0.05[kgm ²]
The viscous friction coefficient between the body and the water	c_1	0.5 [kgm ² /s]
The viscous friction coefficient between the body and the reaction wheel	c_2	0.1 [kgm ² /s]
Feed back gain	$K=[K_p K_d F_p F_d]$	[10 0 1 -0.1]

2.4 小型浮遊機械の姿勢制御問題

2.4.1 粘性摩擦が姿勢制御に及ぼす影響

まずはじめに，式 (2.1) のシステムにおいて，水と機体の間の粘性摩擦係数 c_1 と機体とリアクションホイールとの間の粘性摩擦係数 c_2 が小型浮遊機械の姿勢変化にどのような影響を及ぼしているのかについて考察を行う．ここで，簡単な試みとして PD 制御を行うために，モータの駆動トルク τ を機体の回転角度 θ_1 と回転角速度 $\dot{\theta}_1$ ，リアクションホイールの回転角度 θ_2 と回転角速度 $\dot{\theta}_2$ ，及びそれぞれの目標値 θ_{1s} ， $\dot{\theta}_{1s}$ ， θ_{2s} ， $\dot{\theta}_{2s}$ を用いて以下のように表す．

$$\tau = K_p(\theta_1 - \theta_{1s}) + K_d(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{1s}) - F_p(\theta_2 - \theta_{2s}) - F_d(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{2s}) \quad (2.4)$$

ここで， K_p ， K_d ， F_p ， F_d はフィードバックゲインである [32]．

上記のフィードバック制御則を式 (2.1) に適用して数値シミュレーションを行った．ここで，前述したように制御対象は不可制御であり，可制御性行列のランクは最大で 3 であるので，全ての状態変数を任意に制御することはできない [14][33][34]．そこで，リアクションホイールの姿勢については目標値への制御を行わず，機体の姿勢を目標値に収束させ，リアクションホイールと機体の回転を止めるような制御を試みる．数値シミュレーションで用いる系のパラメータは表 2.1 を用いた．パラメータの値はシステムの挙動が分かり易いように適当な値を使用した．初期状態を $x_0 = [$

$0\ 0\ 0\ 0]^T$, 目標状態を $x_d = [-1\ 0\ 0\ 0]^T$ とし, c_1 と c_2 のそれぞれの粘性摩擦係数の値を考慮する場合と考慮しない場合を変えて数値シミュレーションを行った. 結果を図2.4~図2.7に示す. 以下では, それぞれの結果について考察する.

(Pattern 1) $c_1 \neq 0, c_2 \neq 0$ の場合 (図2.4 参照)

リアクションホイールが回転することにより発生する回転力が作用反作用の法則により反力として機体に伝わり, 機体を目標姿勢に収束するように動かそうとする. 機体に蓄えられた運動エネルギーは時間が経過すると c_1 の影響により消散する. さらに c_1 の影響により粘性摩擦力が機体に伝わり定常誤差を生じる. 機体を運動させた力の反力により蓄積されたリアクションホイールの運動エネルギーは c_2 によって消散しようとするが, 機体の角度に定常誤差が生じているため, 制御入力によるリアクションホイールの駆動トルクによってエネルギーが補われる. その結果, リアクションホイールは一定速度で回転し続ける.

(Pattern 2) $c_1 = 0, c_2 \neq 0$ の場合 (図2.5 参照)

リアクションホイールが回転することにより発生する回転力が作用反作用の法則により反力として機体に伝わり, 機体を目標姿勢に収束するように動かそうとする. c_1 の影響がないので機体に運動エネルギーが一旦蓄積するが, K_p の効果で機体は目標値に収束して静止する. 機体を静止させるために発生する回転力が作用反作用の法則により反力としてリアクションホイールに伝わるが, 角運動量保存則に従って, リアクションホイールはある角度で静止する.

(Pattern 3) $c_1 \neq 0, c_2 = 0$ の場合 (図2.6 参照)

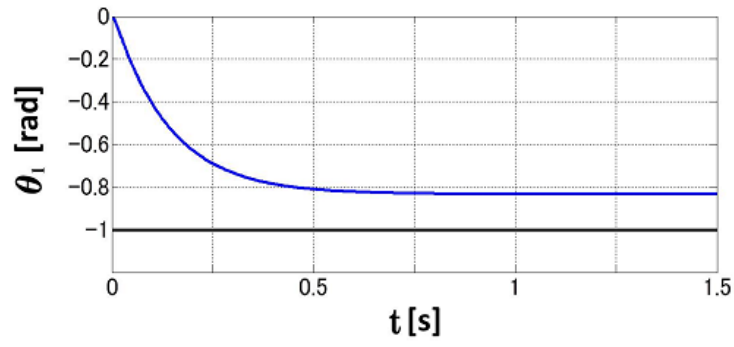
リアクションホイールが回転することにより発生する回転力が作用反作用の法則により反力として機体に伝わり, 機体を目標姿勢に収束するように動かそうとする. 機体に蓄えられた運動エネルギーは c_1 の影響により消散する. さらに, K_p の効果で機体は目標値に収束して静止する. c_2 の影響がないのでリアクションホイールに運動エネルギーが蓄積される. その結果, リアクションホイールは定常速度で回転し続ける.

(Pattern 4) $c_1 = 0, c_2 = 0$ の場合 (図2.7 参照)

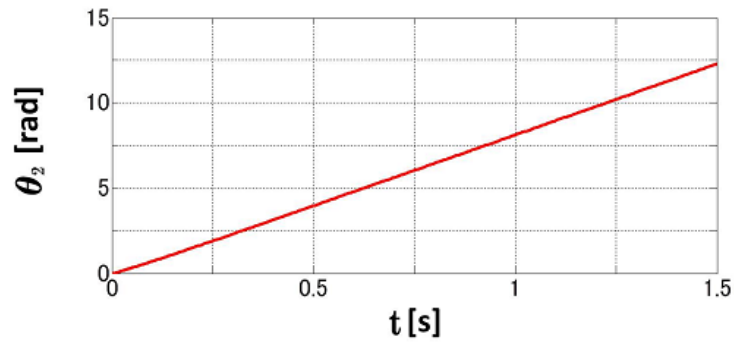
リアクションホイールが回転することにより発生する回転力が作用反作用の法則により反力として機体に伝わり, 機体を目標姿勢に収束するように動かそうとする. c_1 の影響がないので機体に運動エネルギーが一旦蓄積する. c_2 の影響がないのでリ

アクションホイールにも運動エネルギーが一旦蓄積される。 Kp の効果で機体は目標値に収束して静止する。機体を静止させるために発生する回転力が作用反作用の法則により反力としてリアクションホイールに伝わる。その結果、角運動量保存則に従って、リアクションホイールはある角度で静止する。

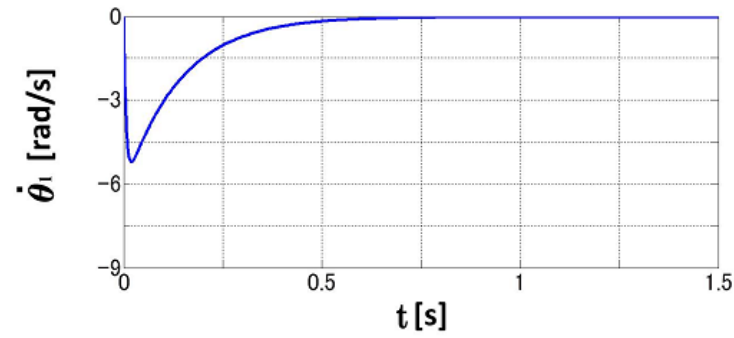
上記の数値シミュレーションの結果より、水と機体間の粘性摩擦及び機体とリアクションホイール間の粘性摩擦が浮遊機械の姿勢に与える影響について次のことが言える。水と機体間および機体とリアクションホイール間に粘性摩擦がある場合、状態フィードバック制御を適用した姿勢制御を行うと、機体の回転角度は目標姿勢に対して定常誤差を残して静止し、リアクションホイールは一定速度で回転し続ける。また、水と機体間に粘性摩擦があり、機体とリアクションホイール間に粘性摩擦がない場合は、機体の回転角度は目標値に収束するが、リアクションホイールは一定速度で回転し続ける。さらに、水と機体間に粘性摩擦がない場合は、機体とリアクションホイール間に粘性摩擦の影響が存在するしないに関わらず、機体の回転角度は目標値に収束してリアクションホイールはある回転角度で静止する。



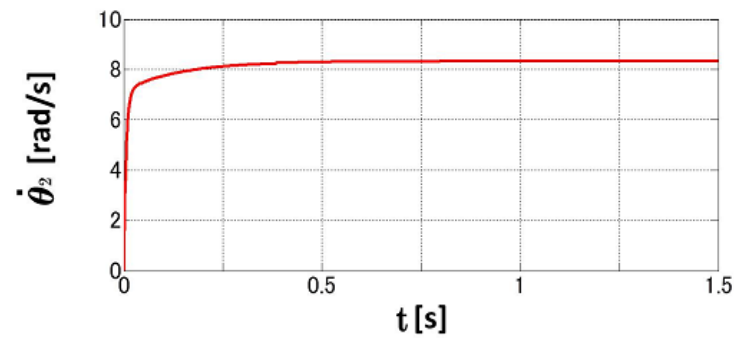
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW

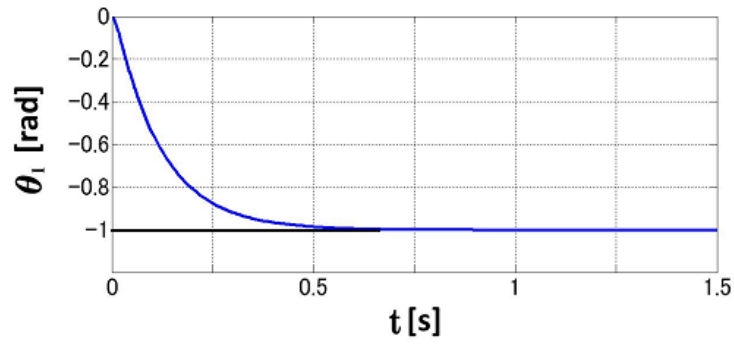


(iii) Angular velocity of the body

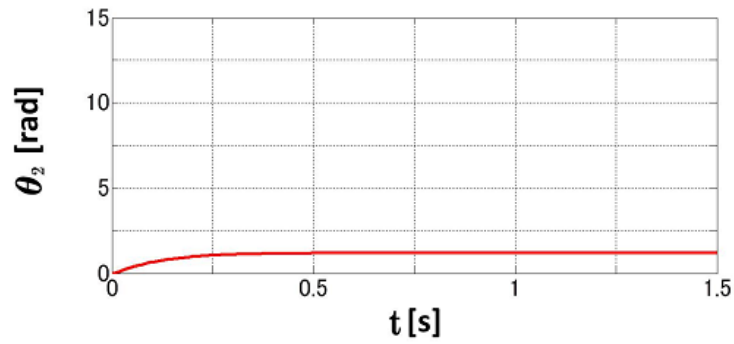


(vi) Angular velocity of the RW

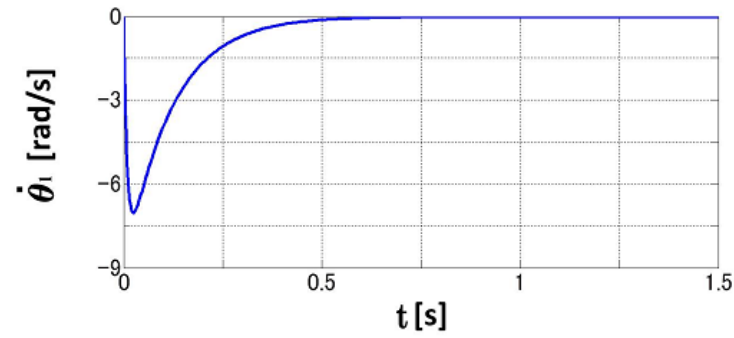
Fig. 2.4: Pattern 1 ($c_1 \neq 0$, $c_2 \neq 0$)



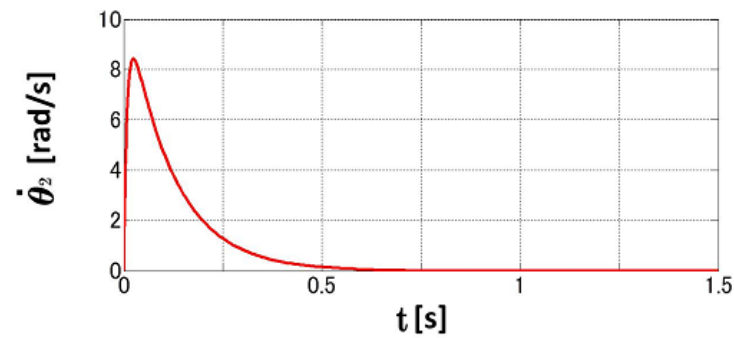
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW

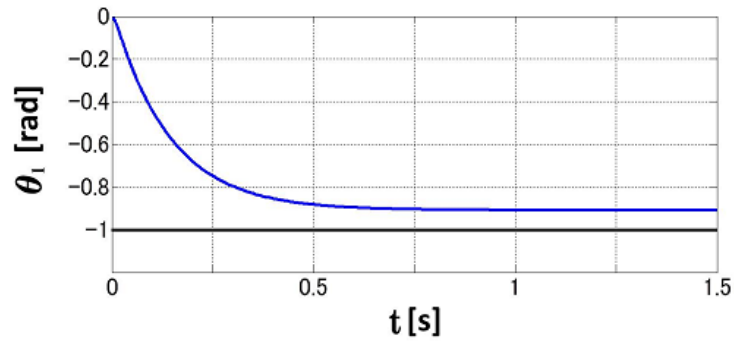


(iii) Angular velocity of the body

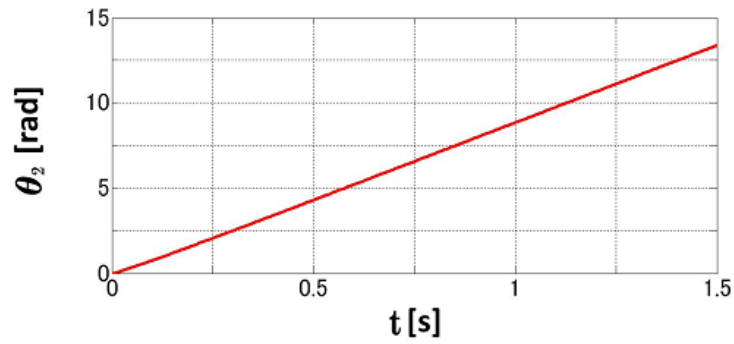


(vi) Angular velocity of the RW

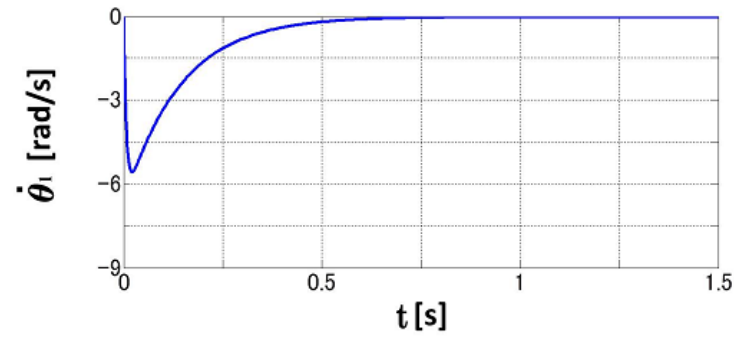
Fig. 2.5: Pattern 2 ($c_1 = 0$, $c_2 \neq 0$)



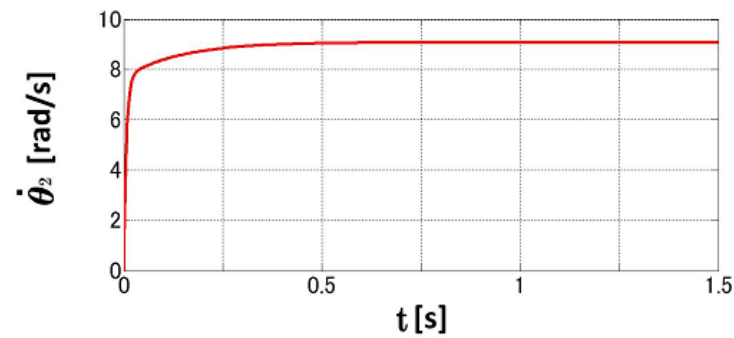
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW

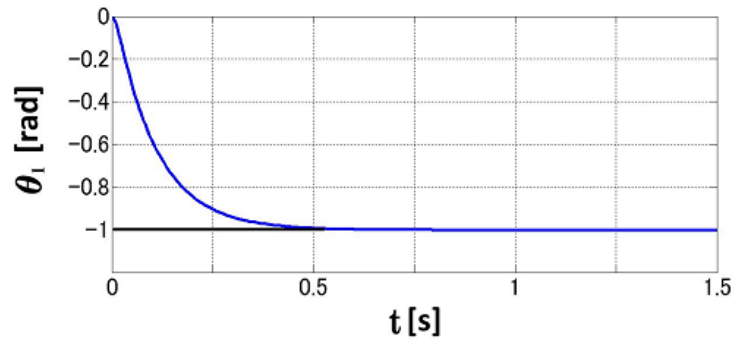


(iii) Angular velocity of the body

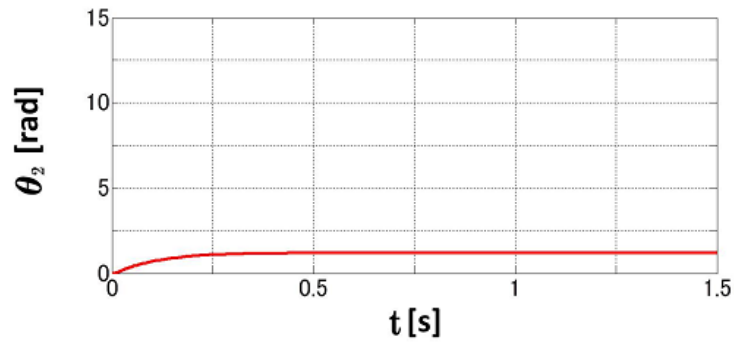


(vi) Angular velocity of the RW

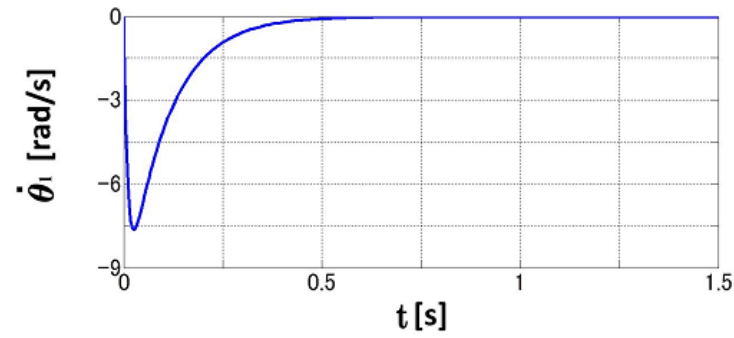
Fig. 2.6: Pattern 3 ($c_1 \neq 0$, $c_2 = 0$)



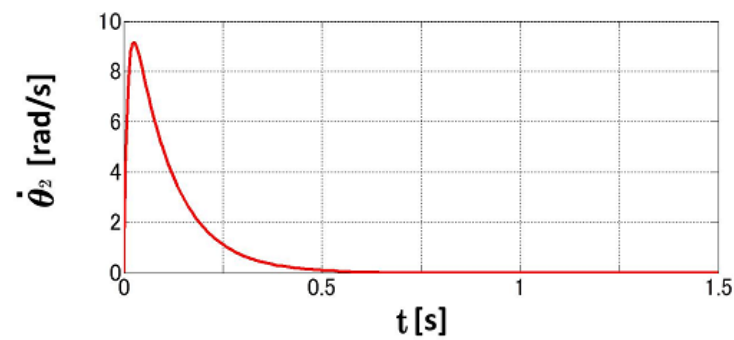
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular velocity of the body



(vi) Angular velocity of the RW

Fig. 2.7: Pattern 4 ($c_1 = 0$, $c_2 = 0$)

2.4.2 アンローディングの問題と初期姿勢への収束

前節では、粘性摩擦が浮遊機械の姿勢に与える影響について考察を行った。その結果から、水と機体間の粘性摩擦の影響により、式(2.4)で表される状態フィードバック制御則を適用した姿勢制御を行うと、リアクションホイールに角運動量が残留して、リアクションホイールが一定の角速度で回転し続けるという問題が起こることを示した。ここで、機体が静止し、リアクションホイールが一定速度で回転し続けている定常状態において、数学モデルでは、以下の関係が成り立っている。

$$\begin{cases} \tau_s = K_p \theta_{1s} + F_d \dot{\theta}_{2s} \\ c_r \dot{\theta}_{2s} = \tau_s \end{cases} \quad (2.5)$$

機体の回転角度が目標値に収束していない影響で、駆動モータが一定の制御トルクを発生している。そして、リアクションホイールと機体間に生じる粘性摩擦と、駆動モータが発生している制御トルクとが釣り合っている。そのため、リアクションホイールは加速も減速もしないで一定の角速度で回転しつづけることになる。

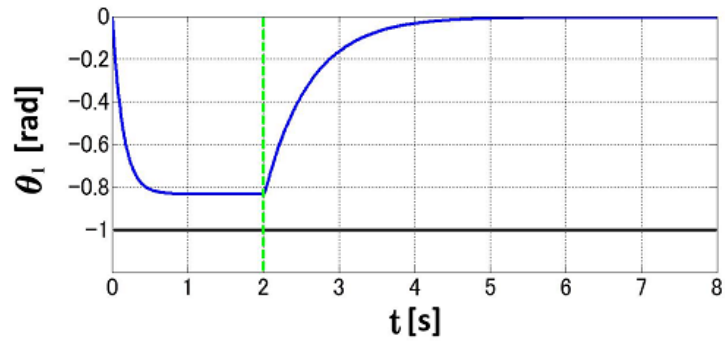
この最終的な定常状態において、トルクユニットの駆動モータは一定のトルク τ_s を発生しつづけており、エネルギーが消費され続けている状況は、制御系として好ましくない。また、外乱が加わるごとに機体の姿勢制御を繰り返し行うと、リアクションホイールに蓄積される角運動量が次第に大きくなることも考えられるが、現実の駆動モータで実現できる角運動量には限界がある。リアクションホイールを用いた人工衛星の姿勢制御では、しばしばこの問題が発生することが知られており、スラストや磁気トルカなどを用いてリアクションホイールの角運動量を減衰（アンローディング）させている [35][36]。このリアクションホイールに残留する角運動量を減衰させるアンローディングを行うことは重要であり、このアンローディングをいかにして行うかが課題となっている。

そこで、アンローディングを行うために、前述した式(2.4)で表されるフィードバック制御則を適用して定常状態になっている時刻 $t = 2[s]$ のとき、モータの駆動トルク τ を 0 にしてみた。その数値シミュレーションの結果を図2.8に示す。この結果より、状態変数は次式のように収束することが確かめられた。

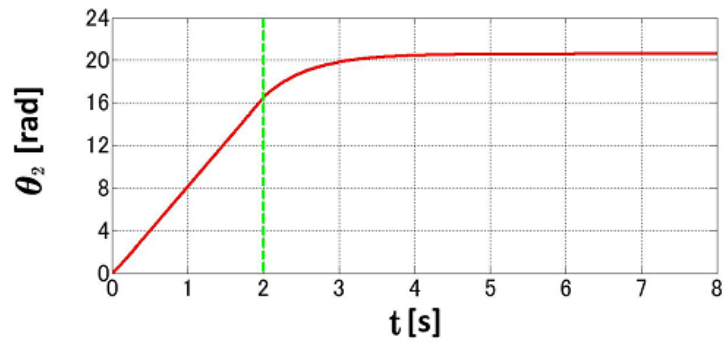
$$x_s = [\theta_{1s} \ \theta_{2s} \ 0 \ \dot{\theta}_{2s}]^T \rightarrow x_e = [\theta_{10} \ \theta_{2e} \ 0 \ 0]^T \quad (2.6)$$

ここで、 θ_{2e} は適当な定数値である。また、 x_s は入力供給を 0 にする直前の状態（機体が静止しリアクションホイールに一定の角運動量が残存している状態）を示し、 x_e は、入力が 0 になり十分に時間が経過した状態を示している。

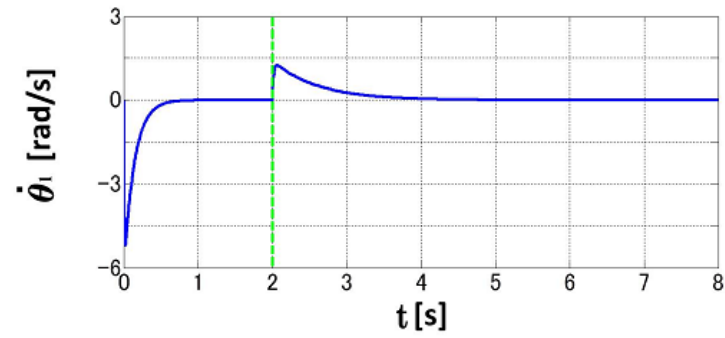
この結果は、以下のとおりに分析できる。駆動モータからのエネルギーの供給がなくなると、リアクションホイールに蓄えられた回転運動のエネルギーは、機体の姿勢角度を変えながら最終的に粘性抵抗により消散する。その際、機体の姿勢角度は状態フィードバック制御を適用したときに静止した目標値の近くから、状態フィードバック制御を行う前の初期姿勢 θ_{10} に逆戻りする。



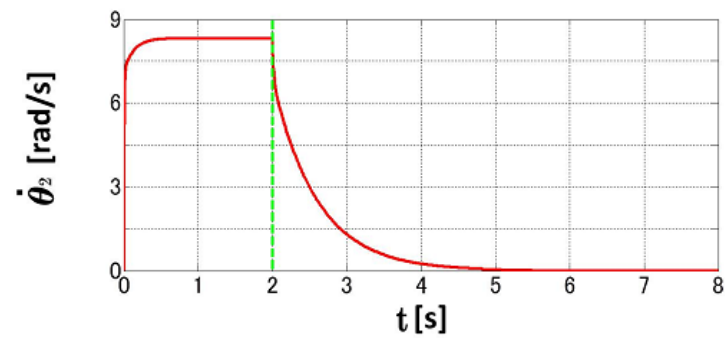
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular velocity of the body



(vi) Angular velocity of the RW

Fig. 2.8: Simulation result after control off (water floating robot)

2.5 粘性摩擦を利用した姿勢制御法

2.5.1 機体が目標姿勢に収束するための条件

ここまでに考察してきたとおり、式 (2.1) のシステムにおいて、式 (2.4) で表される状態フィードバック制御則を用いて機体の姿勢を任意の目標値に収束させることは難しいことがわかる。

そこで、まず機体の回転角度を任意の目標値に収束させるための初期状態の条件について考えてみる。簡単のため初期状態を $x_0 = [\theta_{1s} \ \theta_{2s} \ 0 \ \dot{\theta}_{2s}]^T$ (θ_{1s} , θ_{2s} , $\dot{\theta}_{2s}$ は定数) とする場合を考える。これは、機体がある回転角度で静止しており、リアクションホイールが一定の回転角速度で回転している瞬間の状態を想定したものである。駆動モータの発生トルク τ を 0 にしたときの時刻を初期時刻 $t_0 = 0$ とすると、式 (2.1) より、状態変数の推移は次式で表される。

$$x(t) = e^{At}x_0 \quad (t \geq 0) \quad (2.7)$$

式 (2.7) の右辺の成分を計算することにより、 $t \rightarrow \infty$ としたときに $x_d(t) \rightarrow [\theta_{1d} \ \theta_{2d} \ 0 \ 0]^T$ (θ_{2d} は適当な定数) となるための条件として、次の関係式が導かれる。

$$\dot{\theta}_{2s} = -\frac{c_1}{J_d}(\theta_{1s} - \theta_{1d}) \quad (2.8)$$

よって、機体の回転角度の初期値が θ_{1s} (任意の値) にあるとき、リアクションホイールが $-c_1(\theta_{1s} - \theta_{1d})/J_d$ の回転角速度で回転していれば、駆動モータの発生トルク τ を 0 にすることにより、機体の回転角度を目標値 θ_{1d} へ、リアクションホイールの回転角速度を 0 へ収束させることができる。なお、数値シミュレーションにおけるフィードバックゲイン K_p の値を正の値の範囲で変更すると、機体の回転角度の定常値 θ_{1s} およびリアクションホイールの回転角度の定常値 $\dot{\theta}_{2s}$ は、対応して変化するが、式 (2.8) の関係は変わることなく保たれる。

2.5.2 機体が初期姿勢に戻る条件

式(2.1)で表されるシステムに対して、初期状態を $x_0 = [\theta_{10} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 、目標状態を $x_d = [\theta_{1d} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ として、式(2.4)で表される状態フィードバック制御則を用いると、式(2.9)を満たす姿勢 θ_{1s} で機体は静止し、リアクションホイールは $\dot{\theta}_{2s}$ の回転角速度で回転し続ける。

$$\dot{\theta}_{2s} = -\frac{c_1}{J_d}(\theta_{1s} - \theta_{10}) \quad (2.9)$$

この式(2.9)の関係を満たしている状態で駆動モータの発生トルク τ を0にすると、機体の回転角度は初期姿勢 θ_{10} に戻るだけである。このことは、前節で述べた数値シミュレーションの結果に準ずることがわかる。駆動モータの発生トルク τ を0にして、機体の回転角度を目標値 θ_{1d} に収束させるためには θ_{1s} と $\dot{\theta}_{2s}$ とが式(2.8)の関係を満たしている必要がある。

2.5.3 アンローディングにおける物理パラメータの影響

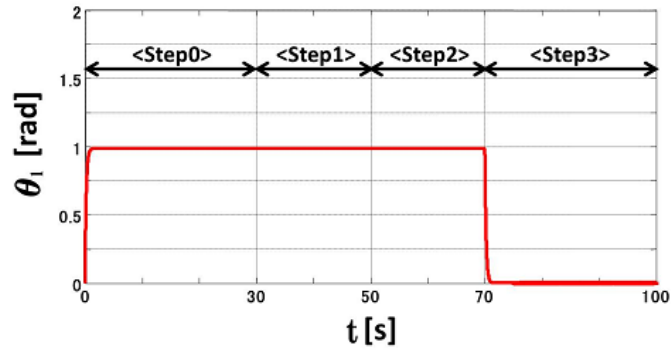
前述したように、式(2.9)の関係から、定常状態のときに駆動モータの発生トルク τ を0にすると機体の回転角度は初期姿勢に戻ってしまう。機体を目標姿勢に制御するには、機体の回転角度 θ_1 とリアクションホイールの回転角速度 $\dot{\theta}_2$ を式(2.8)の関係を満たす値にする必要がある。そこで、式(2.9)の関係を満たしている定常状態のときに、式(2.1)で表されるシステムの状態方程式に使われている物理パラメータの値を変更してから駆動トルク τ を0にすることで、この問題を解決できないか検討する。

ここで、次の(a)～(b)に挙げる物理パラメータの変更を考える。

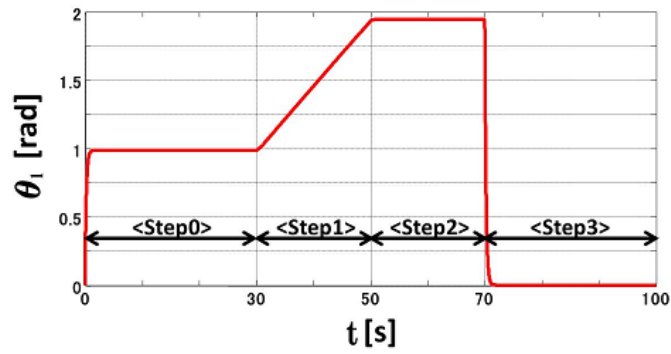
- (a) 機体の慣性モーメント ($J : 0.01 \rightarrow 0.02$)
- (b) リアクションホイールの慣性モーメント ($J_d : 0.05 \rightarrow 0.1$)
- (c) 水と機体間の粘性摩擦係数 ($c_1 : 0.5 \rightarrow 1.0$)
- (d) 機体とリアクションホイール間の粘性摩擦係数 ($c_2 : 0.1 \rightarrow 0.2$)

初期状態を $x_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 、定常状態のときの機体の姿勢を $\theta_1 = 1$ となるように駆動モータのトルクを発生させ、次に示す手順で数値シミュレーションを行った。まず、機体の姿勢角度の初期値を $\theta_1 = 0$ とする初期状態からトルクユニットに機体の姿勢角度が $\theta_1 = 1$ となる駆動トルクを発生させて、定常状態になるまで待つ。そして、定常状態になった後、30 [s]の時点で20 [s]かけて物理パラメータの値を変更する。そして、70 [s]の時点で駆動トルクを0にし、100 [s]まで機体が静止するのを待つ。

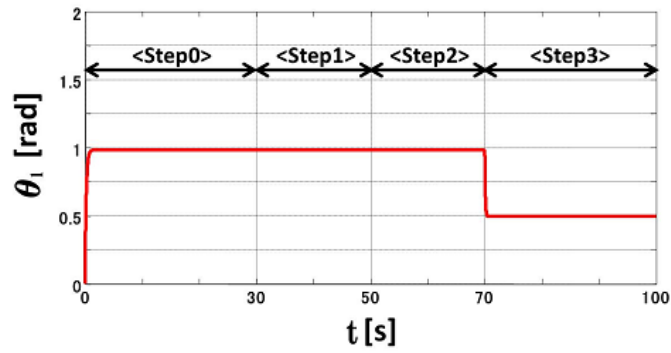
図2.9に、(a)～(b)に挙げる物理パラメータの値を定常状態で変更した場合の数値シミュレーションの結果を示す。図2.9(i)より、定常状態で機体の慣性モーメント J の値を変更しても機体の姿勢に変化はなく、リアクションホイールの駆動トルクを0にすると初期姿勢に戻ることが分かる。また、図2.9(ii), (iv)より、定常状態でリアクションホイールの慣性モーメント J_d 、機体とリアクションホイール間の粘性摩擦係数 c_2 の値を変更すると、機体の姿勢は定常状態の時の姿勢ではない角度になるが、リアクションホイールの駆動トルクを0にすると初期姿勢に戻る。しかし、図2.9(iii)から、定常状態で水と機体間の粘性摩擦係数 c_1 の値を変更すると、機体は定常状態の時の姿勢を維持し続け、リアクションホイールの駆動トルクを0にすると初期姿勢ではない別の姿勢で静止することが分かる。この結果から、定常状態において水と機体間の粘性摩擦係数 c_1 の値を変更することができれば、アンローディングを行いながら機体を任意の姿勢に制御できる可能性があることが分かる。



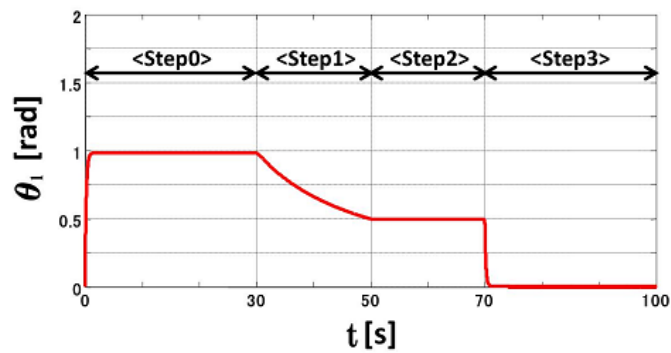
(i) J change



(ii) J_d change



(iii) c_1 change



(vi) c_2 change

Fig. 2.9: Simulation result for change of physical parameters

2.5.4 小型浮遊機械の制御アルゴリズム

2.4.2節で、式(2.9)を満たしている状態で駆動モータの発生トルク τ を0にすると機体の回転角度は、初期回転角度に戻ることを示した。そこで、この問題を解決するための1つの手段として、定常状態になっているときに、工夫を施して、 $-c_1/J_d$ の値を変更することのできる機構を考える。ただし、前項で述べたように、リアクションホイールの慣性モーメントの値 J_d を変更しても、駆動モータの発生トルク τ を0にして、リアクションホイールの回転が止まると、機体は初期姿勢に戻ってしまう。これは、リアクションホイールを変形可能にして J_d の値を変更すると、角運動量が保たれようとする性質から $\dot{\theta}_{2s}$ の値が変化してしまうからである。よって、定常状態において θ_{1s} と $\dot{\theta}_{2s}$ の値が変化しない状態で水と機体の間の粘性摩擦係数 c_1 の値を変更することにする。

駆動モータの発生トルクを0にしたときに、機体の回転角度が目標値 θ_{1d} に収束することのできる定常状態の場合は、式(2.8)より、図2.10に示すとおり傾き $-c_1/J_d$ の直線(実線)で表すことができる。そこで、機体の回転角度を初期値から目標値に制御するために、まず、水と機体の間の粘性摩擦係数 c_1 の値を比較的大きな値 \tilde{c}_1 ($\tilde{c}_1 > c_1$)に変更する。そして、駆動モータのトルクを発生させて、リアクションホイールを回転させ、定常状態になるように制御する。この時、駆動モータの発生トルクで実現可能な定常状態の θ_{1s} と $\dot{\theta}_{2s}$ は次の関係式で表される。

$$\dot{\theta}_{2s} = -\frac{\tilde{c}_1}{J_d}(\theta_{1s} - \theta_{10}) \quad (2.10)$$

この関係式を図2.10に示すと破線で表される。したがって、初めの段階で、駆動モータのトルクを発生させて目指す定常状態は、式(2.8)と式(2.10)とで表される2直線の交点であり、その値は後述する計算により容易に求められる。またさらに、その定常状態を実現するための駆動モータの発生トルクの値は、式(2.5)より $\tau_s = c_2 \dot{\theta}_{2s}$ である。

以上のことから次に示す制御アルゴリズムで姿勢制御を行うことができる。

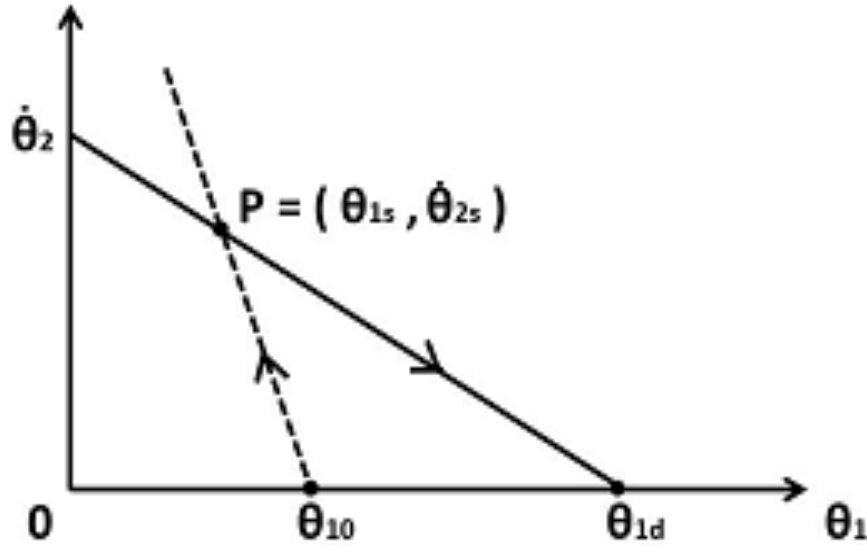


Fig. 2.10: Manifolds for the control method with water floating robot

【小型浮遊機械の制御アルゴリズム】

<Step0> 図 2.10 の交点を求め、 $\dot{\theta}_{2s}$ 、 θ_{1s} の値を求める。

<Step1> 初期姿勢を $x = [\theta_{10} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ とし、水と機体間の粘性摩擦係数の値を \tilde{c}_1 ($\tilde{c}_1 > c_1$) にしておく。

<Step2> 駆動モータのトルクを発生させて、リアクションホイールを回転させる。ただし、発生トルクの値は $\tau_s = c_2 \dot{\theta}_{2s}$ とする。

<Step3> 機体の姿勢角を θ_{1s} にできるだけ維持したままリアクションホイールの角速度を $\dot{\theta}_{2s}$ に近づける。

<Step4> 定常状態になったら、水と機体間の粘性摩擦係数の値を c_1 に変更した後、駆動モータの発生トルクを 0 にする。

提案する制御方法は、リアクションホイールに蓄えられた運動エネルギーを浮遊機械の姿勢制御に利用するものである。また、機体の質量や慣性モーメントが変化しても定常状態でのリアクションホイールの角速度が同じであれば、定常状態での機体の姿勢も同じになるという特徴を持つ。

2.5.5 目標とするリアクションホイールの角速度と機体の姿勢角度

提案手法を実現するためには、図2.10上の交点P $(\theta_{1s}, \dot{\theta}_{2s})$ を予め求めておく必要がある。ここで数学モデルでは、リアクションホイールの回転角速度と機体の回転角度は比例関係であるとしている。よって、簡単な線形方程式から交点Pを求めることができる。初期状態を $(\theta_1, \dot{\theta}_2) = (\theta_{10}, \dot{\theta}_{20})$ 、定常状態を $(\theta_1, \dot{\theta}_2) = (\theta_{1s}, \dot{\theta}_{2s})$ 、目標状態を $(\theta_1, \dot{\theta}_2) = (\theta_{1d}, \dot{\theta}_{2d})$ としたとき、粘性摩擦係数 c_1, \tilde{c}_1 、定常状態におけるリアクションホイールの回転角速度 $\dot{\theta}_{2s}$ と機体の回転角度 θ_{1s} の関係は式(2.11)と式(2.12)で表される。

$$\dot{\theta}_{2s} = -a_1\theta_1 + (-a_1\theta_{10}) \quad (2.11)$$

$$\dot{\theta}_{2s} = -a_2\theta_1 + (-a_2\theta_{1d}) \quad (2.12)$$

ここで、粘性摩擦係数が \tilde{c}_1 のときのリアクションホイールの回転角速度と機体の回転角度の線形方程式の比例定数を a_1 、粘性摩擦係数が c_1 のときの比例定数を a_2 とする。この比例定数は式(2.13)の関係が成り立っている。

$$a_1 = \frac{\dot{\theta}_{2s}}{\theta_{10} - \theta_{1s}}, \quad a_2 = \frac{\dot{\theta}_{2s}}{\theta_{1d} - \theta_{1s}} \quad (2.13)$$

上式から定常状態のときのリアクションホイールの回転角速度 $\dot{\theta}_{2s}$ と機体の回転角度 θ_{1s} は式(2.14)、(2.15)で求めることができる。

$$\dot{\theta}_{2s} = \frac{a_1 a_2 (\theta_{1d} - \theta_{10})}{a_1 - a_2} \quad (2.14)$$

$$\theta_{1s} = \frac{a_1 \theta_{1d} - a_2 \theta_{10}}{a_1 - a_2} \quad (2.15)$$

上式より、初期状態 $(\theta_{10}, \dot{\theta}_{20})$ と目標状態 $(\theta_{1d}, \dot{\theta}_{2d})$ 、および比例定数 a_1, a_2 の値が分かっているならば交点Pを求めることができる。ここで、初期状態と目標状態はあらかじめ定めておくことができる値である。しかし、比例定数の値は現実の環境下においてあらかじめ数学的に求めておくことは難しい。そこで、提案手法を現実のものに適用するために、初期状態を $(\theta_{10}, \dot{\theta}_{20}) = (0, 0)$ とおき、リアクションホイールを一定の角速度 $\dot{\theta}_{2s}$ で回転させ、定常状態になったときの機体の回転角度 θ_{1s} を計測することにより、式(2.13)の第1式から簡単に比例定数の値を求めることができる。

Table 2.2: Physical parameters for the water floating robot in the simulation

J	0.1	c_1	0.01 (Min) 0.05 (Max)
J_d	0.5	c_2	0.01

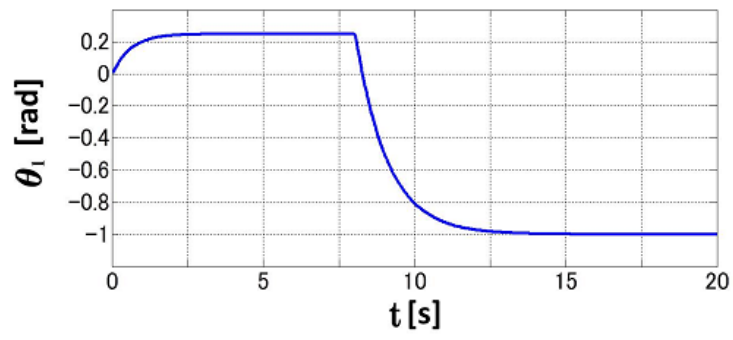
2.5.6 提案手法を用いた数値シミュレーション

以下では、提案した【小型浮遊機械の制御アルゴリズム】を小型浮遊機械に適用した場合の数値シミュレーションの結果について述べる．ここで、初期状態を $x_0=[0\ 0\ 0\ 0]^T$ ，目標状態を $x_d=[\theta_{1d}\ 0\ 0\ 0]^T=[-1\ 0\ 0\ 0]^T$ ，フィードバックゲインを $K=[K_p\ K_d\ F_p\ F_d]=[10\ 0\ 1\ -1]$ とした．数値シミュレーションに用いる物理パラメータは表 2.2 の値を使用した．

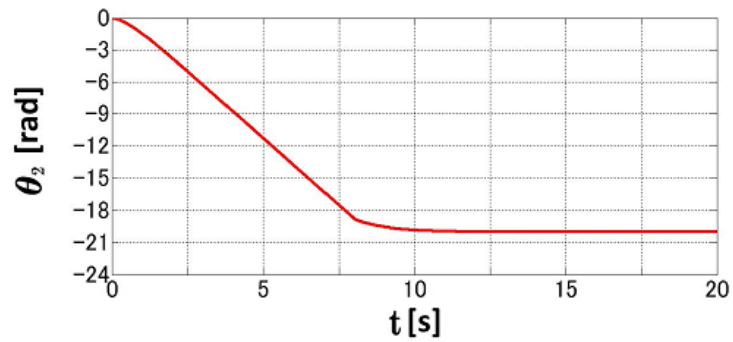
まず、初期状態からトルクユニットに定常状態のときの姿勢角度が $\theta_{1s} = 0.25$ となる駆動トルクを発生させて、定常状態になるまでフィードバック制御を行う．定常状態になった後、6 [s] の時点で 2 [s] かけて水と機体間の粘性摩擦係数 c_1 の値を変更する．そして、8 [s] の時点でモータの駆動トルクを 0 にし、機体が静止するのを待つ．

図 2.11 に数値シミュレーションの結果を示す．リアクションホイールの回転角速度が一定となっている定常状態の時に駆動モータの制御トルクを 0 にすると、直前まで有していた運動エネルギーにより、これまでの回転方向とは逆向きに角運動量が発生している．そして、リアクションホイールに蓄積していた運動エネルギーは全て機体に伝わり、機体に角運動量が発生している．しかし、これらのエネルギーは、水から受ける粘性抵抗によって熱エネルギーとなり散逸することで、リアクションホイール及び機体の回転角速度は 0 に収束していることが分かる．また、機体の回転角度は水から受ける粘性抵抗を変更してやることで、初期姿勢には戻らずに目標姿勢で静止した．ここで、定常状態の時に水面から受ける抵抗の粘性抵抗係数 c_1 を変更しても機体の姿勢に変化はないことが分かる．

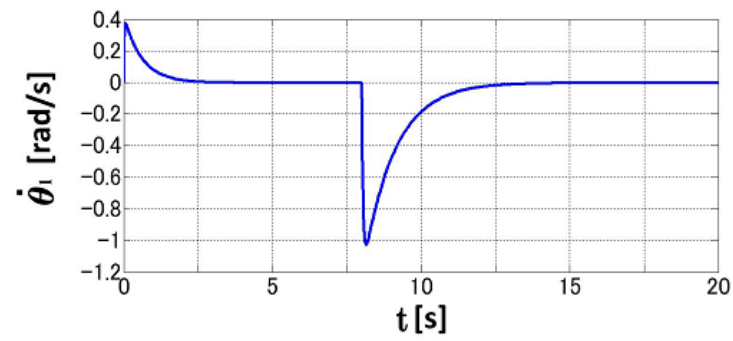
以上の結果から、提案した制御手法が小型浮遊機械に対して実施可能であることを示せた．



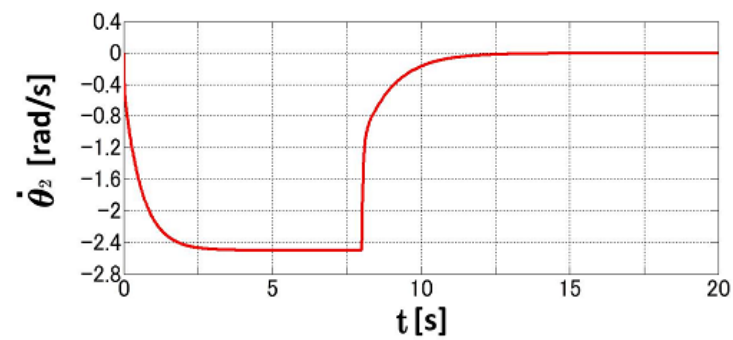
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular velocity of the body



(vi) Angular velocity of the RW

Fig. 2.11: Simulation result for the proposed method (water floating robot)

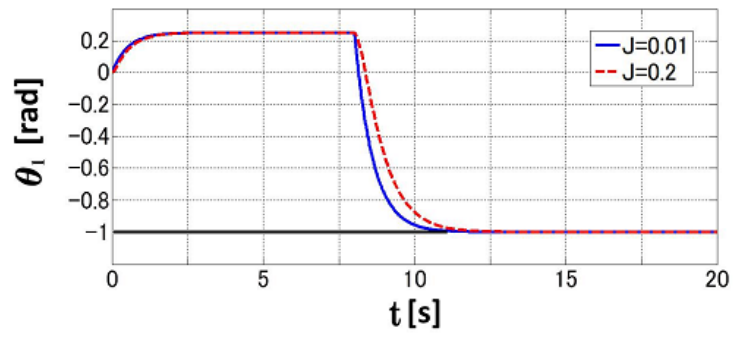
2.6 提案手法の特徴

2.6.1 機体の慣性モーメントの影響

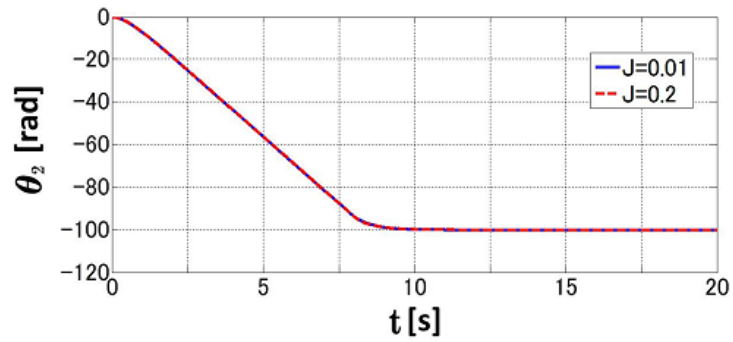
式(2.8)と式(2.10)より数学モデルにおいて、定常状態における機体の姿勢を決める物理パラメータに、機体の質量や慣性モーメントは関係していない。よって、対象とするモデルにおいて、機体の質量や慣性モーメントの大きさが変化したとしても、提案手法を用いた機体の姿勢制御には影響を与えないということが推測できる。

一例として、機体の慣性モーメントを $J=0.01$ 及び $J=0.2$ として【小型浮遊機械の制御アルゴリズム】を適用した数値シミュレーションを行った。初期姿勢を $\mathbf{x}_0=[0\ 0\ 0\ 0]^T$ 、目標姿勢を $\mathbf{x}_d=[-1\ 0\ 0\ 0]^T$ としたときの数値シミュレーションの結果を図2.12に示す。図2.12から見てとれるように、機体の慣性モーメントが大きくなると、リンクが定常状態での姿勢に収束するまでの時間が長くなっている。しかし、定常状態での機体の姿勢は、慣性モーメントの大きさに関わらず同じ値となっていることがわかる。また、駆動モータの制御トルクを0にしてから機体が目標姿勢で静止するまでの時間は、機体の慣性モーメントが大きくなると長くなる。しかし、最終的に機体が静止する姿勢は目標値になっていることがわかる。

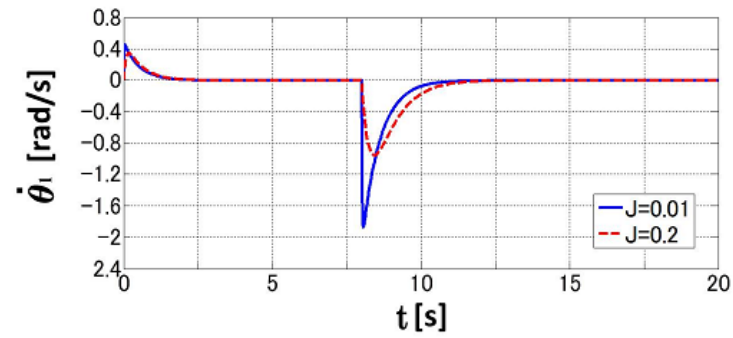
さらに、図2.12から見てとれるように、浮遊機械は機体の慣性モーメントの大きさに関わらず、機体は定常状態および目標状態に収束するとき滑らかに減速しながら静止していることがわかる。よって、提案手法は、機体が振動することなく目標姿勢に制御することができるという特徴があるといえる。



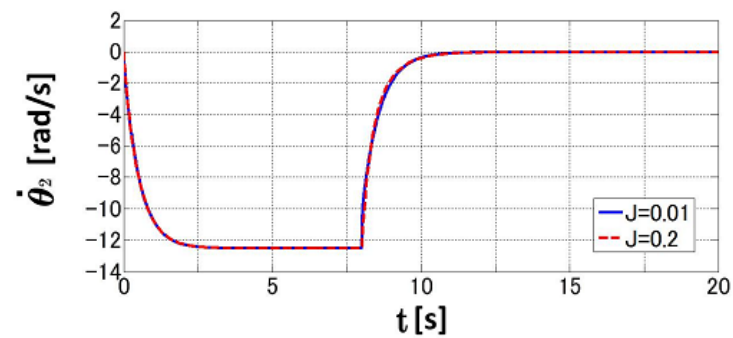
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular velocity of the body



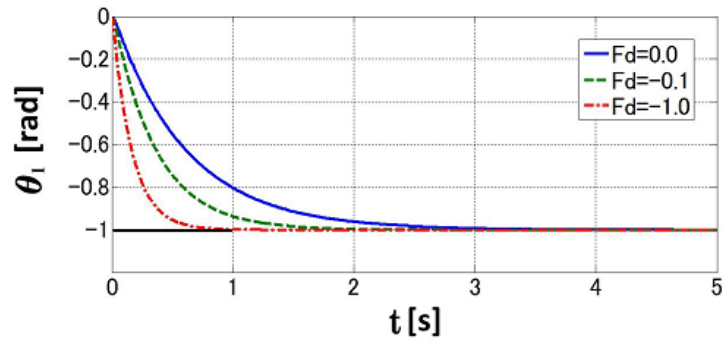
(vi) Angular velocity of the RW

Fig. 2.12: Simulation result by changing moment of inertia of the body

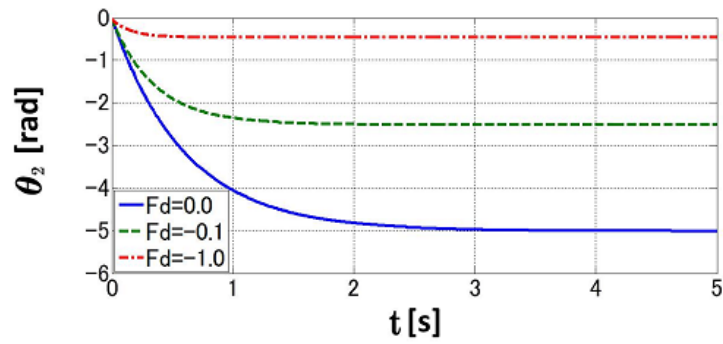
2.6.2 状態フィードバック制御を利用した応答性の変化

【小型浮遊機械の制御アルゴリズム】の<Step4>では、リアクションホイールの回転を止めるために、駆動モータの制御トルクを0にして、自然に止まるまで待っている。ここで、リアクションホイールの回転を積極的に制御して止めた場合、駆動モータの制御トルクを0にするとときと比べて、より大きな反力が発生して、リンクが静止するまでの時間が早くなると考えられる。そこで、リアクションホイールの回転を積極的に止めるために、【小型浮遊機械の制御アルゴリズム】の<Step4>でリアクションホイールの角速度に対する状態フィードバック制御を適用することを試みる。

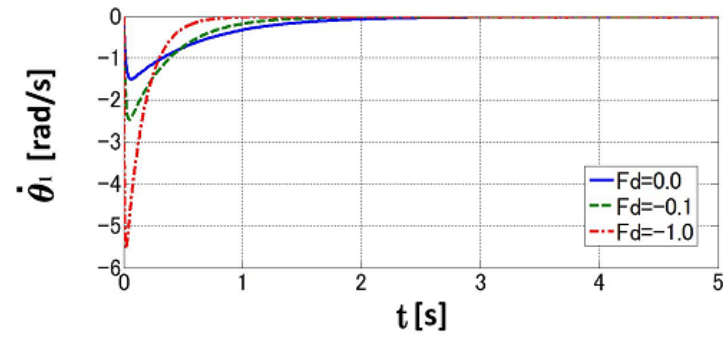
一例として、【小型浮遊機械の制御アルゴリズム】の<Step4>において、リアクションホイールの駆動モータの制御トルクに $\tau = F_d(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{2s})(F_d=0.0, -0.1, -1.0)$ を適用したときの機体の姿勢変化の違いについて数値シミュレーションで確認した。ここで、数値シミュレーションでは、【小型浮遊機械の制御アルゴリズム】の<Step3>が終了し、リンク1の姿勢が $\theta_1 = 0$ [rad]、リアクションホイールが角速度 $\dot{\theta}_2 = -10$ [rad/s] で回転している状態を $t = 0$ [s] とする。数値シミュレーションで用いる系のパラメータは表2.1を用いた。以上の条件で行った数値シミュレーションの結果を図2.13に示す。図2.13(ii)(iv)より、リアクションホイールの駆動モータの制御トルクに状態フィードバック制御を適用すると、リアクションホイールの回転は制御トルクを0にしたときと比べて早く止まることが確認できる。そして、図2.13(i)(iii)より、リアクションホイールの回転が止まる時間が早いと、機体は大きな角速度で目標姿勢に収束していることがわかる。よって、制御トルクに状態フィードバックを適用することで、提案手法の応答性を向上させることができることがわかる。



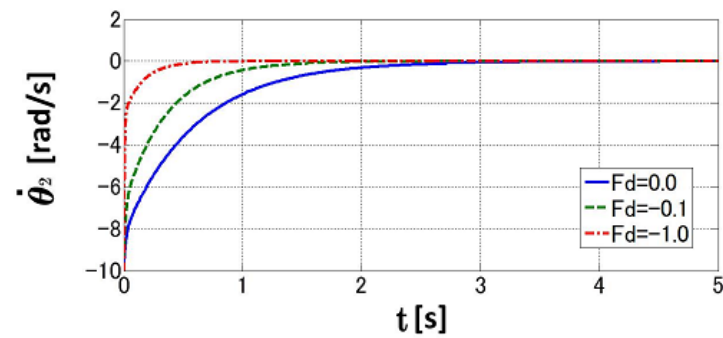
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular velocity of the body



(vi) Angular velocity of the RW

Fig. 2.13: Simulation result with state feedback control (water floating robot)

2.7 検証モデルの製作

以下では、検証実験のために作成した実験モデルについて述べていく。図2.14に試作した小型浮遊機械の実験モデルを示す。

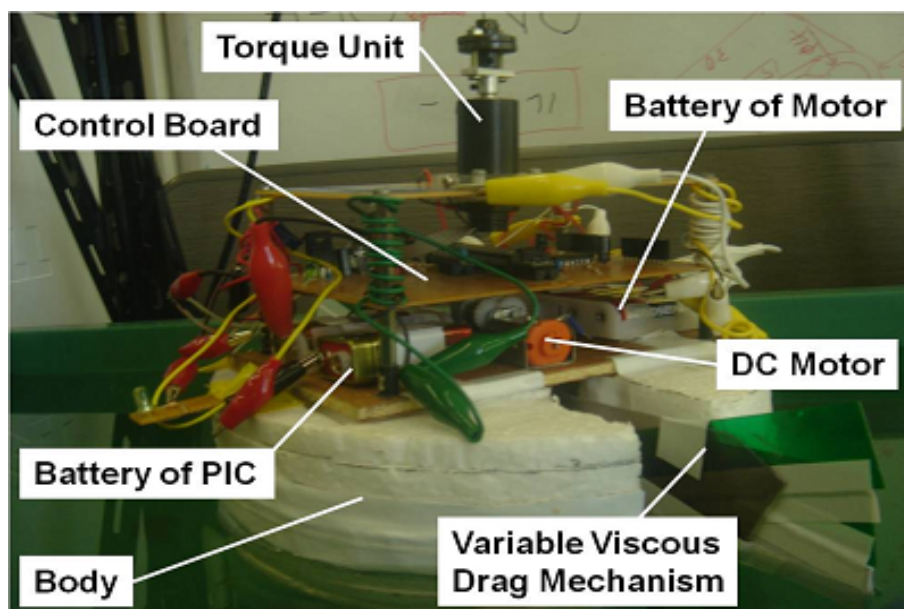


Fig. 2.14: Experimental model of water floating robot

2.7.1 機体

機体の材質には、主に発砲スチロールを使用しており、機体上面に、制御基盤とバッテリー、およびトルクユニットを搭載している。機体下面には、機体の重心を通る鉛直線状に、スチール製の丸棒（質量225 [g]、長さ120 [mm]、直径10 [mm]）を水槽の底に触れないように取り付けている。この丸棒を取り付けることで、実験モデル全体の重心位置が下がり、転覆することを防止し、かつ実験モデルが並進方向に移動するのを防ぐ効果を期待している。機体の直径は200 [mm]あり、トルクユニットを含めた機体仮面からの高さは228 [mm]、トルクユニットおよび丸棒を含む全質量は1250 [g]である。

Table 2.3: Spec of DC Micro Motor

Performance	Value	Unit
Rated Voltage	6	V
Maximum Output	20.50	W
Idling Speed	9000	rpm
Starting Torque	87.2	mNm
Rotational Constant	1650	rpm/V
Torque Constant	5.77	mNm/A
Weight	88	g

2.7.2 トルクユニット

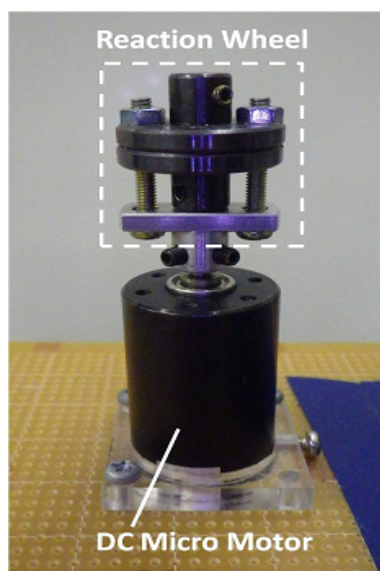


Fig. 2.15: Torque Unit

実験モデルで使用しているトルクユニットを図 2.15 に示す。実験モデルのトルクユニットは機体の重心位置上方に載せており、その駆動モータには、ファールハーバー製の DC マイクロモータ (2342006CR) を使用している。スペックは表 2.3 に示す通りである。そして、リアクションホイールとしてモータ軸に軸継ぎ手 (直径 22 [mm], 質量 25 [g]) を使用している。

Table 2.4: Spec of DC Motor

Performance	Value	Unit
Rated Voltage	3	V
Idling Speed	12000~13600	rpm
Starting Torque	5.93	mNm
Weight	17	g

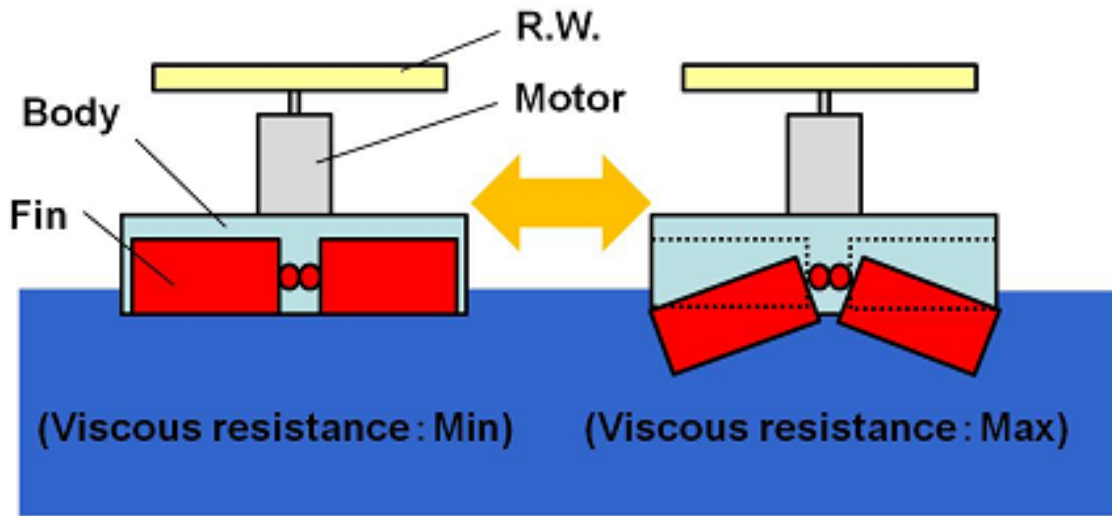


Fig. 2.16: Variable structure fins

2.7.3 粘性抵抗可変機構

提案手法を実現するためには、環境との間に発生する粘性抵抗（本ケーススタディにおいては水と機体との間の粘性抵抗）を変更できる機構が必要である．そこで、図2.16に示すように機体下部から水中にフィンを出し入れすることで粘性抵抗を変更させる方法をとることにする．粘性抵抗を変更させるための機構として図2.17に示すようなものを考案する．この機構は、モータの駆動力を三つのマイタにより二軸の回転に振り分けることで、フィンの上げ下げを行うようにしている．実際に製作した装置を図2.18に示す．材料は主にアクリル材を使用しており、タミヤ製のDCモータ（トルクチューンモータ GP.134）を駆動力として使用している．DCモータのスペックはTable.2.4に示す．フィンを上下させたときの実験モデル全体の状態を図2.19に示す．

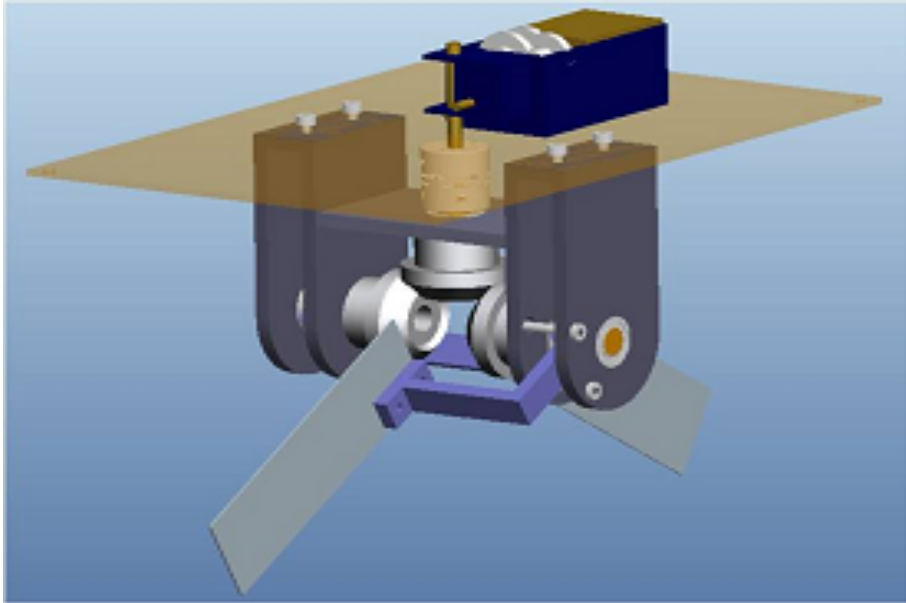


Fig. 2.17: Variable Viscous Drag Mechanism

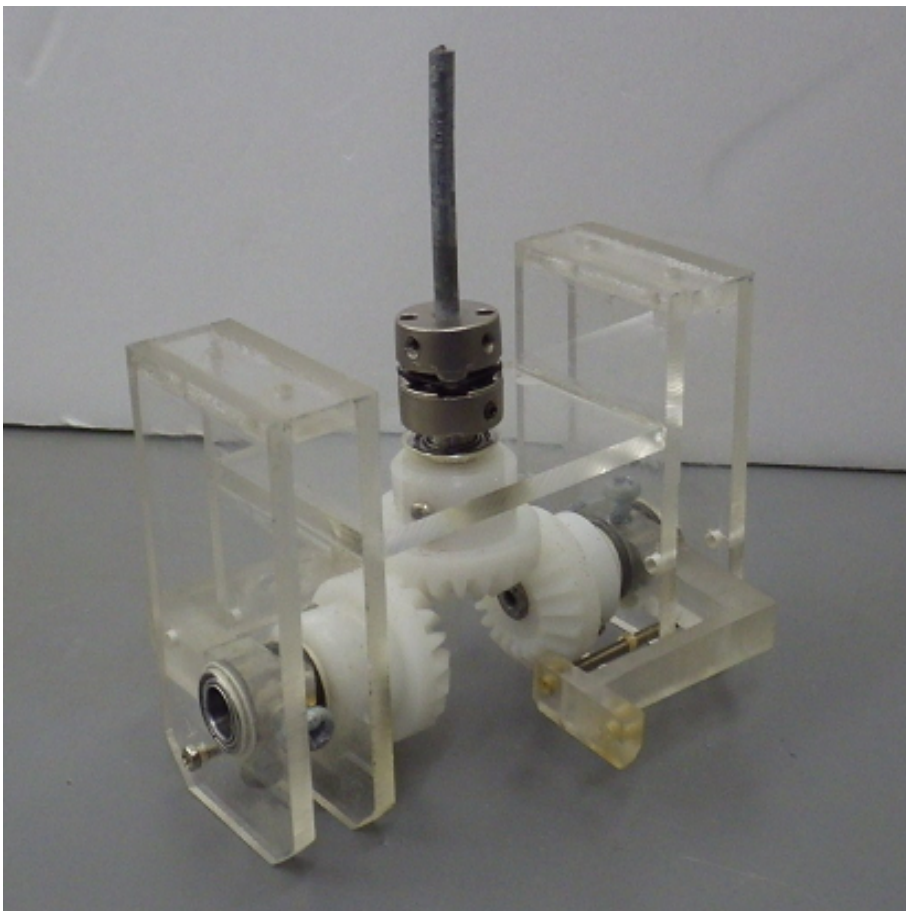
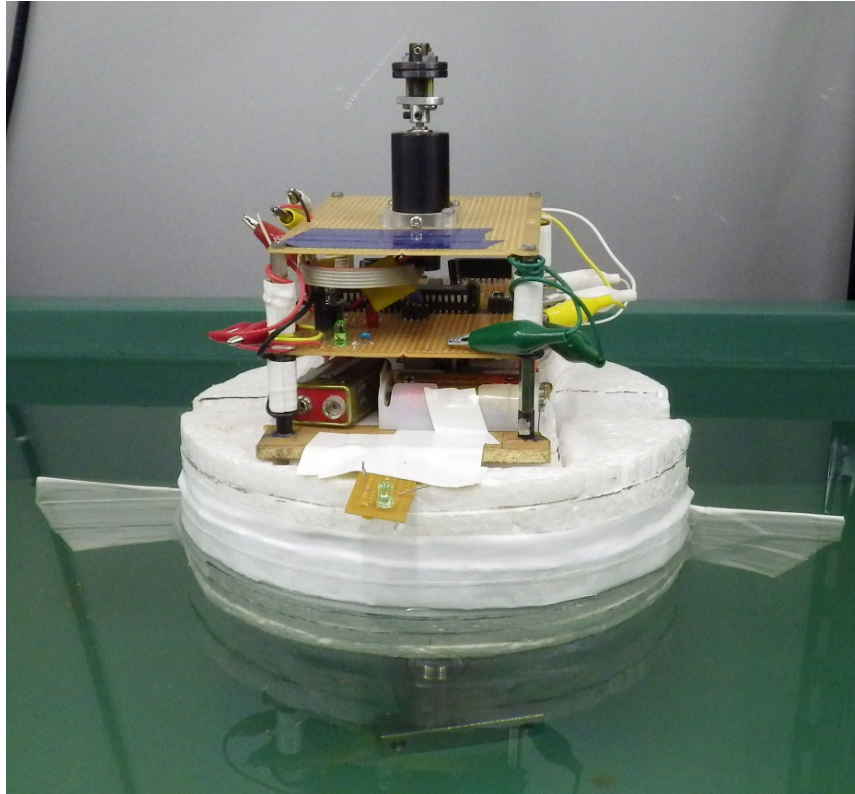
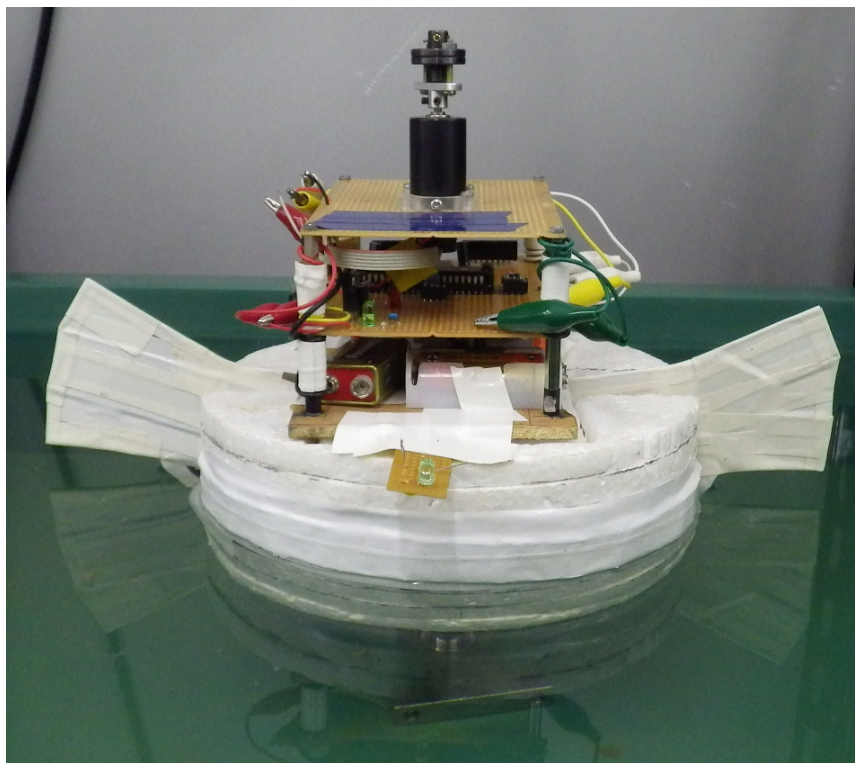


Fig. 2.18: Variable Viscous Drag Mechanism



(i) Setting the fins down



(ii) Setting the fins up

Fig. 2.19: Transformable fins of the experimental model

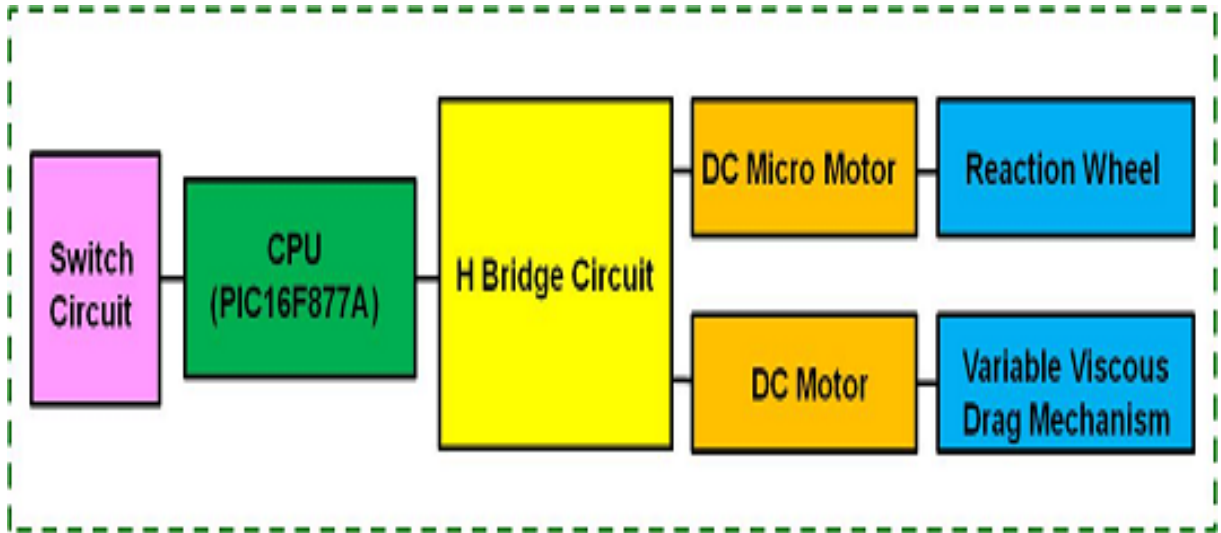


Fig. 2.20: System structure

2.7.4 制御基板

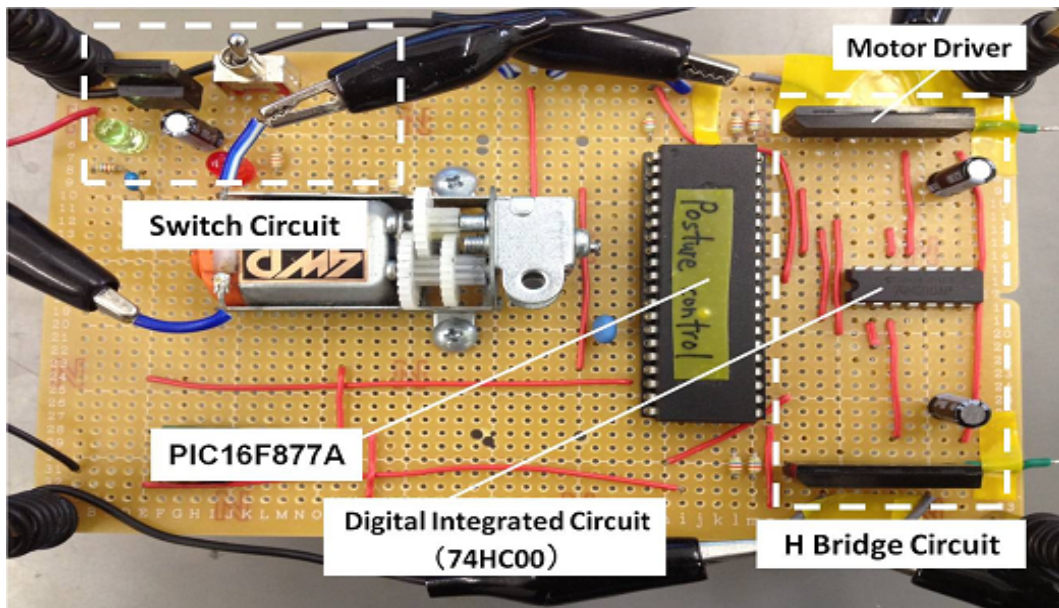


Fig. 2.21: Control Unit

実験モデルの制御システム構成を図 2.20 に示す．制御基盤にはスイッチ回路，PIC マイコン (PIC16F877A)，論理スイッチ (74HC00) とパワー MOSFET モジュール (MP4212) で構成される H ブリッジ回路を図 2.21 のように配置している．以下では，それぞれの機能について説明する．

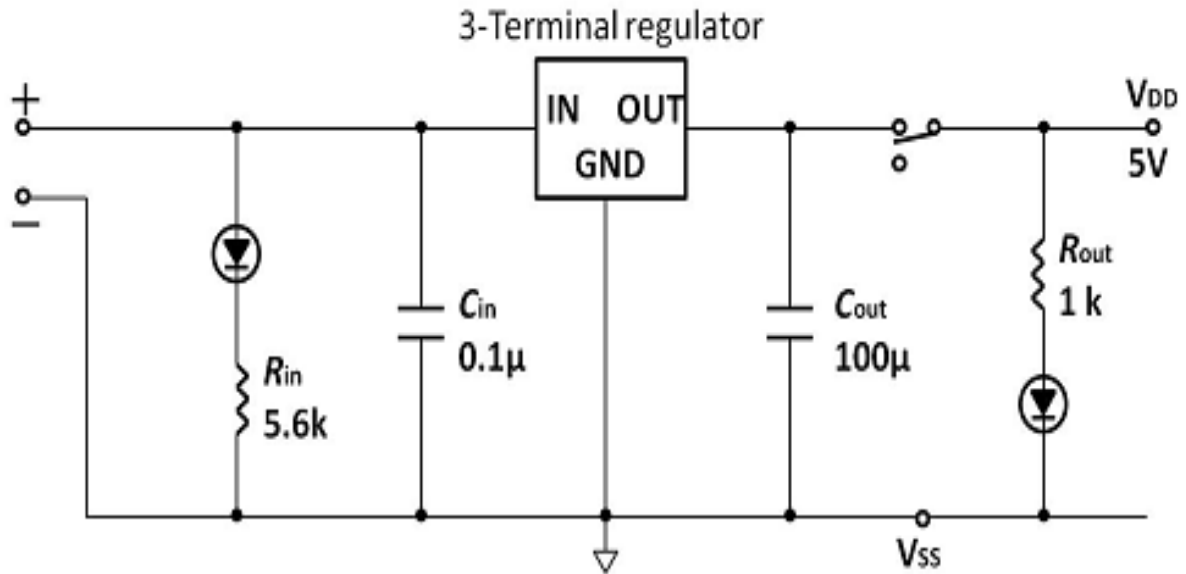


Fig. 2.22: Switch Circuit

(i) スイッチ回路

基盤上で三端子レギュレータを用いて安定化電源を作成している。図2.22に安定化電源の部分の回路図を示す。三端子レギュレータとは、半導体の一種で、入力する電圧を変換して出力端子側に必要な電圧を発生させる部品である。入力する電圧は出力端子に必要な電圧よりも高い電圧が必要で、一般的な三端子レギュレータでは、入力する電圧は出力する電圧よりも3~4[V]高い必要がある。本回路では、電源にPanasonic製のアルカリ乾電池(9[V])を使用し、PICマイコンの定格電圧5[V]になるように変換できるものを使用している。出力される電圧は目的とする電圧に近いものの、安定しないため、コンデンサなどで電圧を調整する必要がある。入力側の積層セラミック・コンデンサ(0.1[μ])は発振防止用のコンデンサで、出力側の電解コンデンサ(100[μ])は負荷の急激な変動に対応するものである。出力にスイッチを設け、回路の電源のON/OFFを簡単にしている。

Table 2.5: Spec of the PIC16F877A

Performance	Rated value	Unit
Source voltage	-0.3~7.5 or -0.3~6.5	V
Max allowable power	0.8 or 1.0	W
Supply current per power pin	200 or 250	mA
Supply current per a pin	± 25	mA
Supply current per a port	100 or 200	mA



Fig. 2.23: PIC16F877A

(ii)PIC マイコン

PIC マイコンとは CPU, メモリ, I/O が 1 チップに収められたマイクロコントローラである。専用の機器でプログラムを書き込むことで様々な動きを実現することができる。本研究では, MPLAB-IDE で開発した作動プログラム (C 言語) を PIC プログラマで PIC に実装している。図 2.23 には今回用いた PIC16F877A を, 表 2.5 にそのスペックを示す。PIC マイコンには, あらかじめ様々な機能が搭載されており, プログラム内で宣言することで自由に引き出すことができる。実験モデルでは電源の ON/OFF 制御および PWM (Pulse Width Modulation: パルス幅変調) を用いた DC モータの速度制御を行っている。PWM とは, 周期を一定にして電圧の ON/OFF の割合を可変にする機能で, 通電する時間の平均エネルギーを可変制御するものである。これらの機能を利用して, 提案手法を実現する。

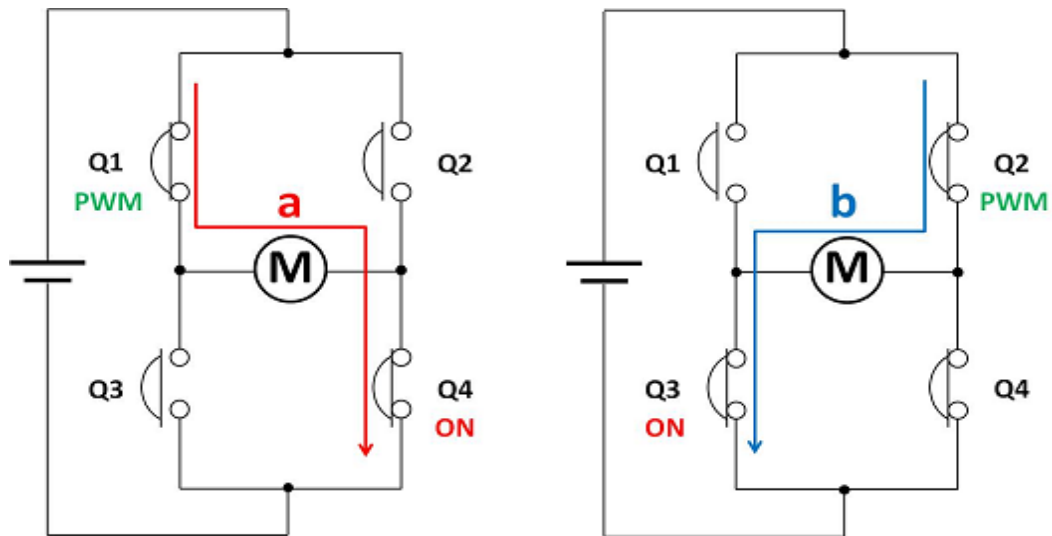


Fig. 2.24: H Bridge Circuit

(iii)Hブリッジ回路

Hブリッジ回路とは、DCモータを可逆可変速で制御するとき一般的に用いられる回路である。その回路構成図は図2.24に示す通りである。

この回路でモータを回転させるときには、Q4をONとしてPWMでQ1をパルス制御する。この場合、モータの電流はaの方向に流れモータを回転させる。モータを逆回転させるときは、Q3をONとしてPWMでQ2をパルス制御する。この場合、モータの電流はbの方向、つまり逆方向に電流が流れるので、モータの回転も逆転することになる。

このブリッジ回路の制御で絶対にしてはならないことは、Q1とQ3またはQ2とQ4を同時にONにしてしまうことである。その場合、回路がショートしてしまい、最悪の場合回路が壊れてしまう恐れがある。実験モデルでは論理スイッチとパワーMOSFETモジュールを利用し、Hブリッジ回路を構成している。

2.8 提案手法の実現可能性の確認

2.8.1 実験環境

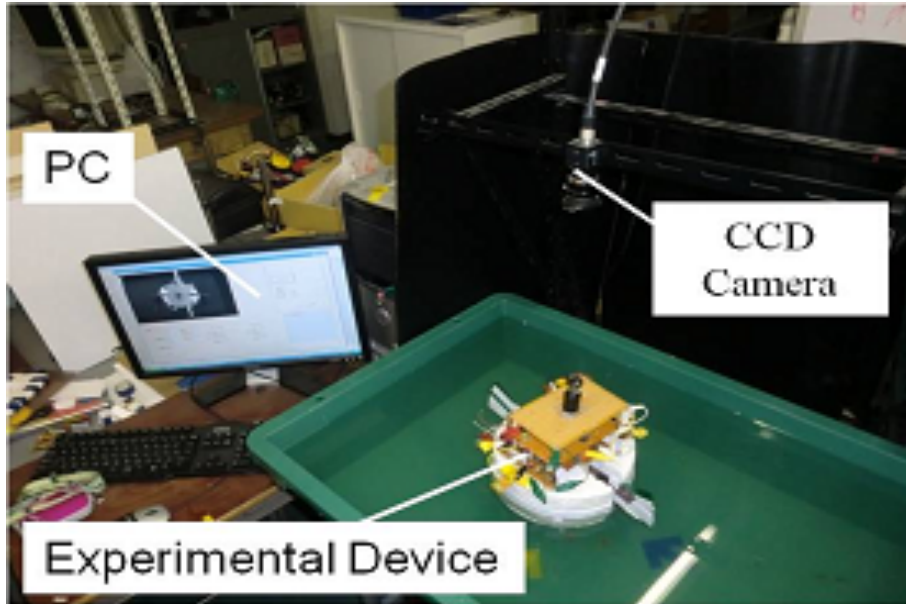


Fig. 2.25: The experimental environment

検証実験の環境に、図2.25に示すような水槽（縦600 [mm]，横900 [mm]，深さ200 [mm]）を用意した。その水槽に水を張り，検証モデルを浮かべている。機体の並進運動を防ぐために，シャフトホルダを水槽の底に固定し，機体の底面中心にシャフトを固定し，シャフトホルダに取り付けることで機体が並進運動することを防ぎ，機体は回転運動のみを行うようにした。

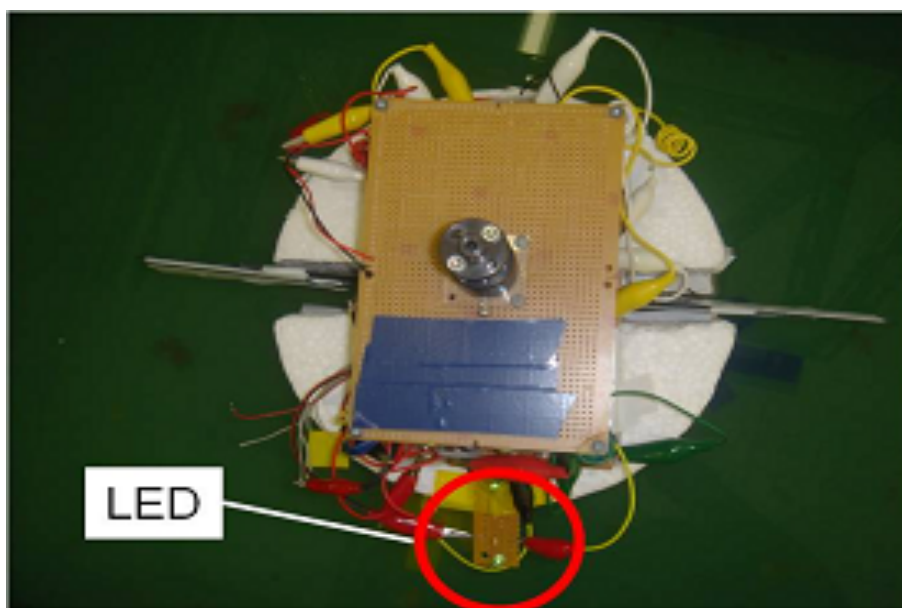


Fig. 2.26: LED

2.8.2 HALCON を用いた画像処理

検証実験を評価する方法として(株)Linxの画像処理ソフトHALCONを用いる。HALCONはCCDカメラから画像を取り込み、画像処理アルゴリズムを作成し、アプリケーションを作成することができる画像処理システムである。本研究では、HALCONで作成した画像処理プログラムをVisualC++で開発したアプリケーションに実装し機体の位置検出を行う。位置検出の方法として2値化と呼ばれるカメラから取り込んだ画像から特定の部分だけを領域として抽出する方法で行う。本報告では固定しきい法を用いて抽出する画像領域を判別する。

図2.25に示すように、検証機上部にCCDカメラを固定し、検証機に取り付けてあるLEDの光を2値化により読み取り、PCに位置情報を保存するようになっている。そして、実験終了後に、HALCONを用いて機体の姿勢変化をオフラインで数値データ化して、制御結果を評価する。

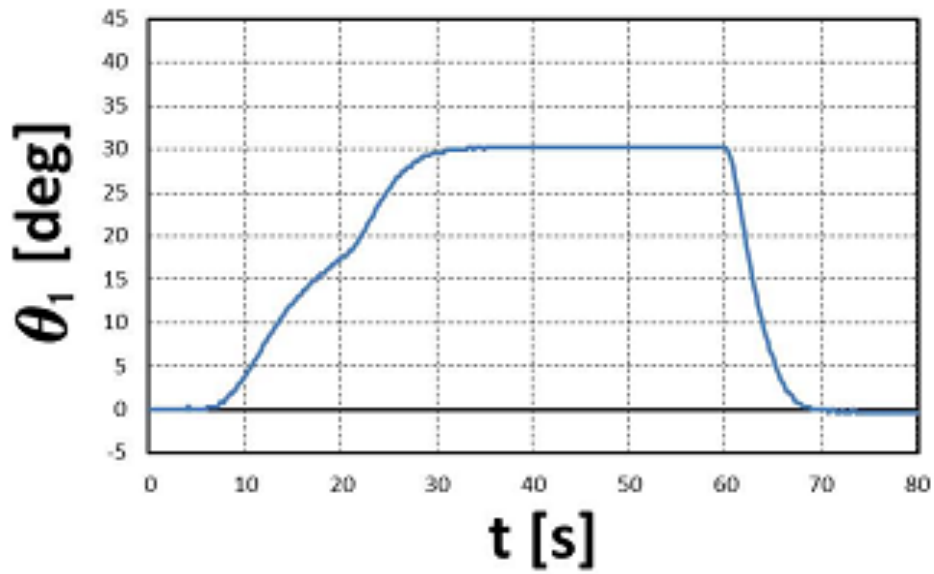
2.8.3 粘性摩擦可変機構を用いた機体の姿勢変化

実験モデルを用いて、トルクユニットで駆動する小型浮遊機械の挙動を検証し、提案手法の実現可能性を確認する。

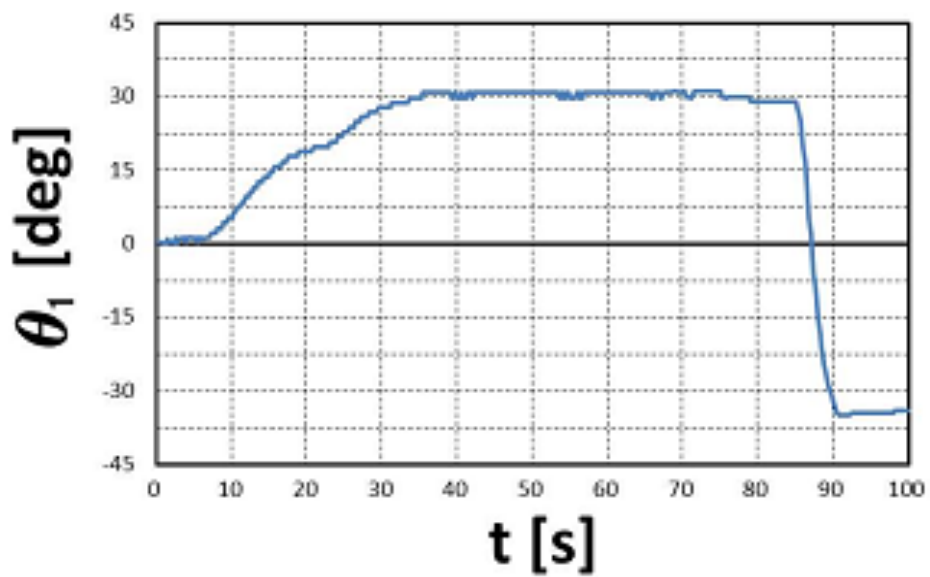
まず、機体下面にフィンを下げた形態で、機体の姿勢角度の初期値を $\theta_{10} = 0$ [deg] とする静止状態から、トルクユニットに指令電圧 $u = 3.0$ [V] を加えてリアクションホイールを回転させる。そして定常状態になった後、指令電圧を $u = 0$ [V] にしてリアクションホイールの回転を止めた。その実験結果を図 2.27(i) に示す。この実験では、CCD カメラによる検査開始後 5[s] の時点で指令電圧を加え、60 [s] 時点で指令電圧を 0 [V] にしている。この結果から、トルクユニットに指令電圧 $u = 3.0$ [V] を加えると、リアクションホイールが一定の角速度で定常状態になるまでに、機体の姿勢角度が約 30 [deg] 変化して静止することが分かった、また、定常状態になった後にトルクユニットへの指令電圧を $u = 0$ [V] にしてリアクションホイールの回転を止めると、機体の姿勢角度が初期値に戻ることが確認できた。

次に、同様に機体下面にフィンを下げた形態で、機体の姿勢角度の初期値を $\theta_{10} = 0$ [deg] とする静止状態から、トルクユニットに指令電圧 $u = 3.0$ [V] を加えてリアクションホイールを回転させる。そして定常状態になった後、フィンを下げた形態から上げた形態へ変更し、再び定常状態になるまで待った後、指令電圧を $u = 0$ [V] にしてリアクションホイールの回転を止めた。その実験結果を図 2.27(ii) に示す。この実験でも CCD カメラによる検査開始後 5 [s] の時点で指令電圧を加えている。そして、60 [s] 時点でフィンを上げ始め、85 [s] 時点で指令電圧を 0 [V] にしている。この結果から、トルクユニットに指令電圧 $u = 3.0$ [V] を加え、リアクションホイールが一定の角速度で定常状態になった後、フィンを下げた形態から上げた形態に変更し、トルクユニットの指令電圧を 0 [V] にすると、定常状態の姿勢から約 -65 [deg] だけ回転し、初期姿勢から約 -35 [deg] の姿勢で静止することが分かった。よって、フィンを上げることで水との粘性の値が変わり、初期姿勢ではない別の姿勢で静止することが確認できた。

以上の結果より、作成した実験モデルを用いた実験結果は、数値シミュレーションの結果と同様にフィードバック制御の途中で粘性の値を変更しないで駆動モータのトルクを 0 にすると初期姿勢に戻り、粘性の値を変更してあげると初期姿勢ではない別の姿勢で機体は静止するということが分かった。よって、製作した検証モデルを使用することで、提案手法を実際実現することが可能であるといえる。



(i) Setting the fins down



(ii) Setting the fins from down to up

Fig. 2.27: Step response with $u=-3.0$ [V]

2.8.4 トルクユニットの指令電圧と機体の姿勢角度の関係

まず、機体下面にフィンを下げた形態で、機体の姿勢角度の初期値を $\theta_{10} = 0$ [deg] とする静止状態から、トルクユニットに指令電圧 $u = -2.0$ [V] を加えてリアクションホイールを回転させて定常状態になるまでの実験を行った。その実験結果を図2.28(i)に示す。この結果から、トルクユニットに指令電圧 $u = -2.0$ [V] を加えると、リアクションホイールが一定の角速度で定常状態になるまでに、機体の姿勢角度が約 19 [deg] 変化して静止することが分かった。ところで数学モデルでは、トルクユニットへの指令電圧，駆動モータの発生トルク，定常状態におけるリアクションホイールの回転角速度，機体の姿勢角度の変化量は，すべて比例すると仮定している。そこで， $\tau_s = Fu = c_2 \dot{\theta}_{2s}$ の関係を考慮すると，図2.28(i)の結果からフィンを下げた形態で，トルクユニットへの指令電圧に対する機体の姿勢角度の変化量に係る比例定数は，約 -0.1 と見積もることができる。

さらに，機体下面からフィンを上げた形態で，機体の姿勢角度の初期値を $\theta_{a0} = 0$ [deg] とする静止状態から，トルクユニットに指令電圧を $u = -2.0$ [V] を加えてリアクションホイールを回転させて定常状態になるまでの実験を行った。その実験結果を図2.28ii)に示す。この結果から，機体下面からフィンを上げた形態で，トルクユニットに指令電圧 $u = -2.0$ [V] を加えると，機体の姿勢角度が約 40 [deg] 変化して静止することが分かった。図2.27(i)，図2.28(i)の結果と合わせて，機体下面からフィンを上げた形態は，水から受ける抵抗が小さいため，トルクユニットへの指令電圧が同じ値であっても，フィンを下げた形態と比べて機体の姿勢角度が約2倍変化することが分かった。よって，フィンを挙げた形態で，トルクユニットへの指令電圧に対する機体の姿勢角度の変化量に係る比例定数は，約 -0.05 と見積もることができる。

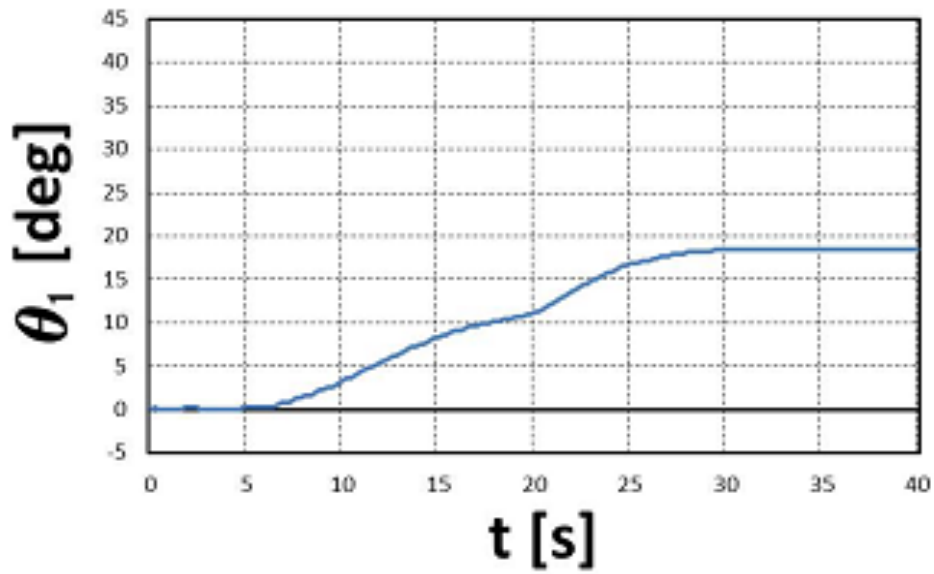
以上の実験データをもとに，機体の姿勢角度の初期値を θ_{10} ，目標値を θ_{1d} としたとき，フィンを下げた形態と上げた形態のときのトルクユニットの指令電圧と機体の姿勢角度の関係を求める。まず，フィンを下げた形態のまま，定常状態で実現されるトルクユニットへの指令電圧と機体の姿勢角度は式(2.16)で表される直線上になる。

$$u = -0.1(\theta_1 - \theta_{10}) \quad (2.16)$$

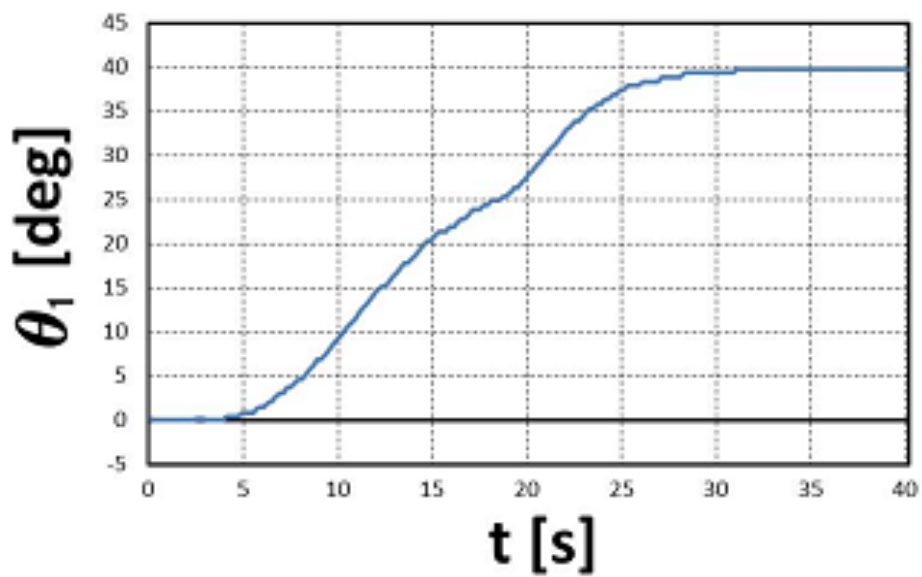
同様に，フィンを上げた形態のまま，定常状態で実現されるトルクユニットへの指令電圧と機体の姿勢角度は式(2.17)で表される直線上になる。

$$u = -0.05(\theta_1 - \theta_{1d}) \quad (2.17)$$

提案手法の制御アルゴリズム (Step0) における 2 直線の交点は、式 (6.1), (6.2) の交点を求めればよい。そのときの制御概念図を図 2.29 に示す。よって、定常状態になるときのトルクユニットの指令電圧は、機体の姿勢角度の初期状態と目標状態をあらかじめ定めておくことで簡単に求めることができる。



(i) Setting the fins down



(ii) Setting the fins up

Fig. 2.28: Step response with $u=-2.0$ [V]

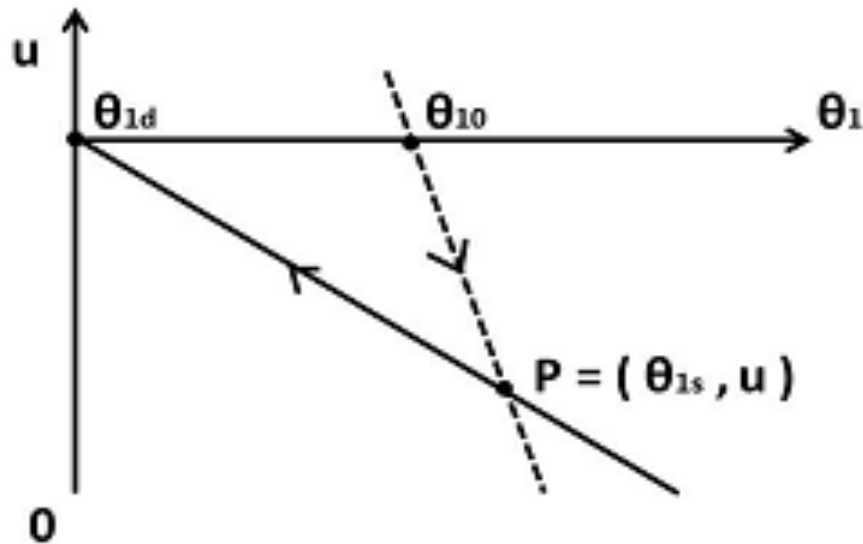


Fig. 2.29: Manifolds for the control experiment of water floating robot

2.8.5 実験結果

機体の姿勢角度の初期値を $\theta_{10} = 45$ [deg], 目標値を $\theta_{1d} = 0$ [deg] としたときに, 提案手法の適用を試みる. 式 (2.16) と式 (2.17) より, 図 2.29 の交点は $P(u, \theta_{1s}) = (-4.5, 90)$ と求めることができる. 提案手法を実験モデルで行うための姿勢制御のフローチャートを図 2.30 に示す. このフローチャートに沿って行った制御実験の結果を図 2.31 に示す. 時刻 0 [s] では, フィンを下げて機体の姿勢角度の初期値を 45 [deg] としている. 時刻 5 [s] の時点で指令電圧 $u = -4.5$ [V] を入力して, リアクションホイールを回転させている. リアクションホイールが一定の角速度で定常状態になるまでに, 機体の姿勢角度が 90 [deg] に近い約 88 [deg] に変化して静止している様子がわかる. 時刻 65 [s] から 85 [s] にかけて, フィンを下げた形態から上げた形態へ変更している. このとき, わずかに機体の姿勢角度が乱されている様子が分かる. そして, 時刻 95 [s] にトルクユニットへの指令電圧を 0 [V] にすると, リアクションホイールの回転が止まり, 機体の姿勢角度が目標値 0 [deg] に近づいている.

以上の実験結果から, 粘性抵抗以外のモデルに考慮していない水の抵抗や複雑な流れによる外乱の影響が見受けられるが, 提案手法による制御が実施可能であることを確認することができた.

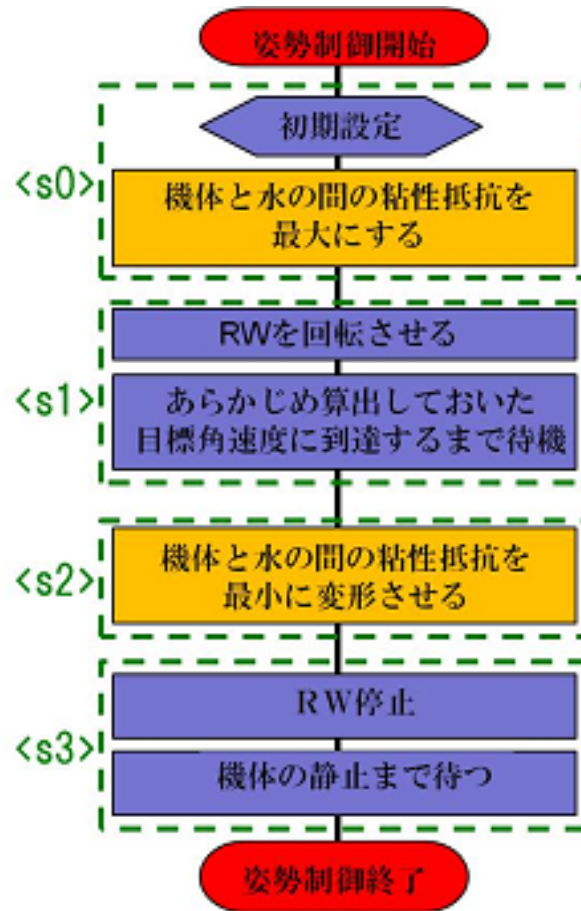


Fig. 2.30: Flow chart of posture control

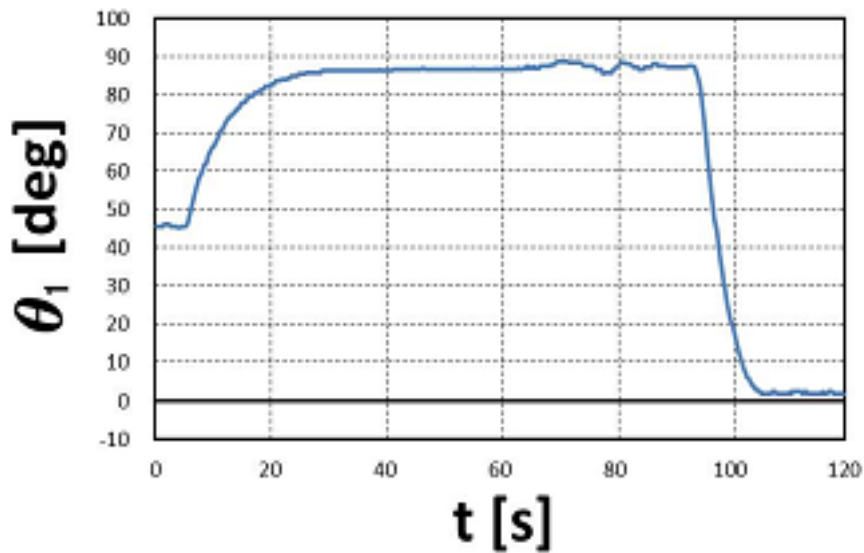


Fig. 2.31: Control experiment with the proposed method of water floating robot

第3章 1リンクTUMの姿勢制御

以下では，環境から粘性摩擦の影響を受ける1リンクトルクユニットマニピュレータの姿勢制御問題を考える．ここでいう環境とは，地面に固定されたベースのことを指す．トルクユニットマニピュレータは，ベースとリンクが回り対偶で拘束されているため，姿勢制御においてベースとリンクの間に生じる粘性摩擦の影響を考慮することは重要となる．

3.1 トルクユニットマニピュレータ (TUM)

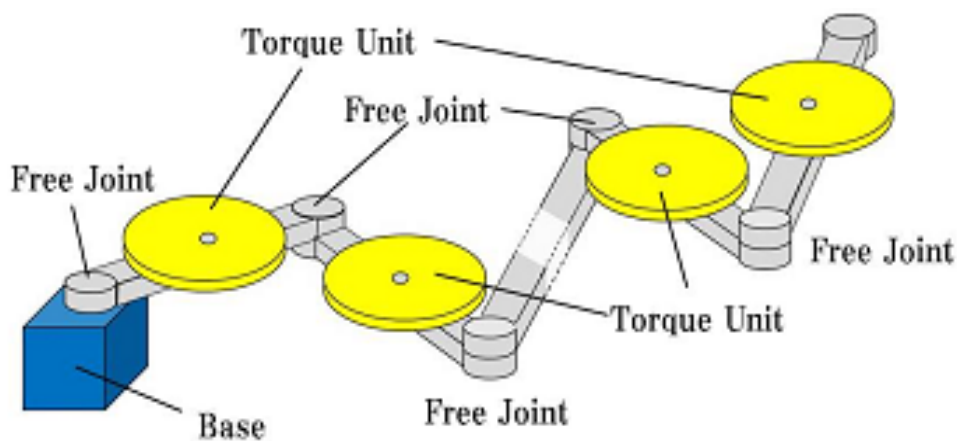


Fig. 3.1: Torque Unit Manipulator (TUM)

非駆動関節を有する回転リンクマニピュレータの駆動装置に，トルクユニットを使用するものとして，トルクユニットマニピュレータ (TUM) と呼ばれるものが提案されている．図3.1にTUMの簡易図を示す．TUMは，次に示すような利点がある．

保守の容易性 :トルクユニットはリンクとは独立しているのので，脱着が自由である．
よって，モータが故障した場合，トルクユニットを取り外して交換 (修理) するだけでよい．

冗長アクチュエータ : 一つのリンクにトルクユニットを複数個取り付けることで、冗長性を持たせることができる。

動特性の変更可能 : トルクユニットをリンクの任意の位置に装着することができるので、装着位置によってマニピュレータの動特性を容易に変更できる。

これらの利点の中でも、特に一つ目と二つ目の利点から、TUMは人間の作業が困難な宇宙などでの利用が期待できる。加えて、トルクユニットは取り付け、取り外しが容易であるため、例えば、宇宙構造物などの収納、展開時に使用後、取り外して他の作業に流用できるといった利点もある。

3.2 1リンク TUM の数学モデル

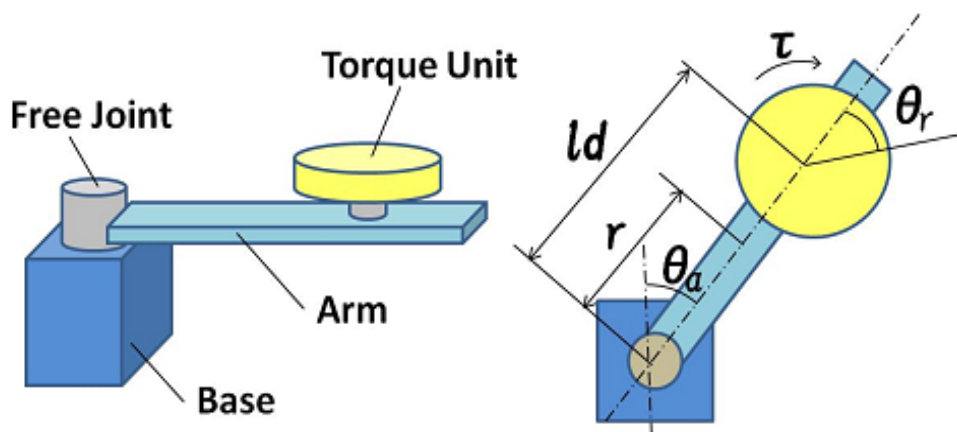


Fig. 3.2: The model of 1-link TUM

図3.2に関節が非駆動関節でトルクユニットが1機装着されている1リンクTUMを示す。非駆動関節は地面に固定されたベース（環境）とつながっている。このTUMは環境（ベース）との間に水平面内を1自由度で回転する関節を持ち、トルクユニット内のリアクションホイールは、装着位置で水平面内を1自由度で回転する構造になっている。ここで、 m_a をリンクの質量、 J_a をリンクの重心回りの慣性モーメント、 r を関節からリンクの重心までの距離とする。 m_r をリアクションホイールの質量、 J_r をリアクションホイールの慣性モーメント、 l_d を関節からリアクションホイールの回転中心までの距離、 θ_r をリンクの回転角度、 θ_a をRWのリンクに対する相対回転角

度, c_a をベースとリンクの間の粘性摩擦係数, c_r をリンクとリアクションホイール
 の間の粘性摩擦係数, τ をリアクションホイールの駆動トルクとする. ここでは, ト
 ルクユニット内のモータは質点であるとモデル化し, 直接駆動トルクをリアクショ
 ンホイールに与えることができるものとしている. 空気抵抗については考慮しない.
 以上の仮定のもとで状態変数を $x = [\theta_a \ \theta_r \ \dot{\theta}_a \ \dot{\theta}_r]^T$ として状態方程式を導くと以下の
 ように表わされる.

$$\dot{x} = Ax + B\tau \quad (3.1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -c_a/J & c_r/J \\ 0 & 0 & c_a/J & -c_r(J + J_r)/JJ_r \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1/J & (J + J_r)/JJ_r \end{bmatrix}^T$$

$$J = J_a + m_a r^2 + m_r J_r^2$$

この状態方程式は, 第2章で制御対象とした小型浮遊機械の状態方程式 (2.1) と同
 じ形をしているので, リンクの姿勢制御に第2章で提案した制御則を適用できると
 考えられる.

Table 3.1: Physical parameters of 1-link TUM

parameter	symbol	value
The mass of the link	m_a	0.806 [kg]
The mass of the reaction wheel	m_r	0.176 [kg]
The length of the link	l_a	0.3 [m]
The distance to center of rotation of the reaction wheel from the joint of the link	l_r	0.15 [m]
The moment of inertia of the link	J_a	0.0038 [kgm ²]
The moment of inertia of the reaction wheel	J_r	0.00234 [kgm ²]
The viscous friction coefficient of the link axis	c_a	0.05 [kgm ² /s]
The viscous friction coefficient on the motor axis of the reaction wheel	c_r	0.01 [kgm ² /s]

3.3 1リンク TUM の姿勢制御問題

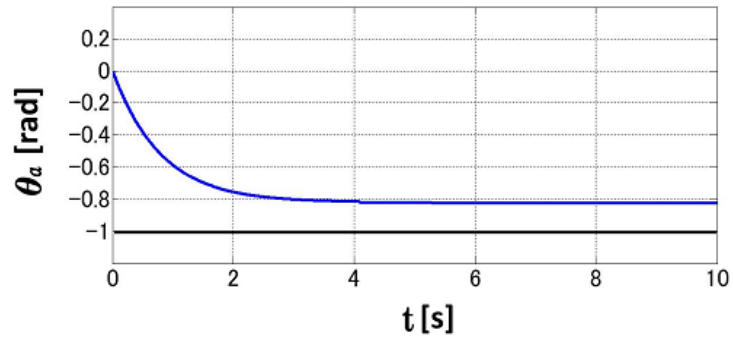
以下では、式 (3.1) の状態方程式で表される 1リンク TUM の姿勢制御問題について、2.4 節と同様の手順で考えていく。ここで、式 (3.1) の状態方程式から、可制御性行列のランクが 3 であるのでシステムは可制御ではない。よって、不可制御な極が虚軸上にあるため連続で滑らかな状態フィードバック制御則 $\tau = K(\mathbf{x} - \mathbf{x}_d)$ ($K = [K_{pa} \ K_{pr} \ K_{da} \ K_{dr}]^T$) で、任意の平衡点を漸近安定にすることはできない。

一例として、表 3.1 に示すパラメータの値を用いて数値シミュレーションを行った。物理パラメータの値は、文献 [10] を参考にして決めた。ここで、前述したように制御対象は不可制御であり、全ての状態変数を任意に制御することはできない。そこで、リアクションホイールの角度については目標値への制御を行わず、リンクの角度を目標値に収束させ、リアクションホイールとリンクの回転を止めるような制御を試みる。初期姿勢を $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 、目標姿勢を $\mathbf{x}_d = [-1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ として数値シミュレーションを行った結果を図 3.3 に示す。

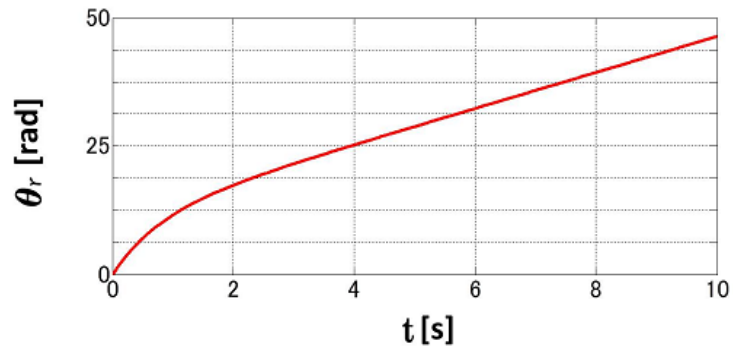
この結果から、状態フィードバック制御則によりリンクの回転角度は初期値から目標値に近づこうとするが、定常偏差 θ_{as} (定数) を残して静止することが分かる。また、リアクションホイールは一定の角速度 $\dot{\theta}_{rs}$ で回転し続けることが分かる。この結果は、次のように考察することができる。

リアクションホイールが回転することにより発生する回転力が作用反作用の法則

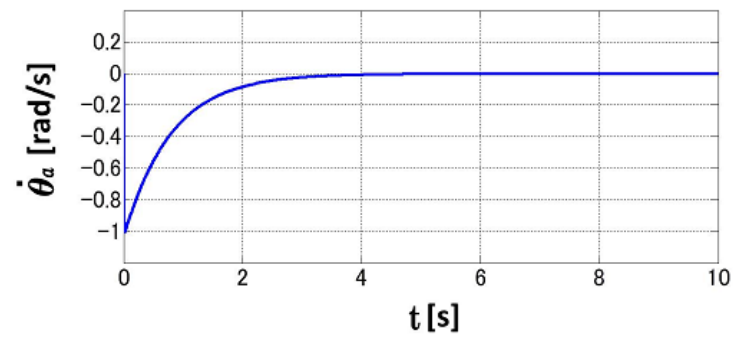
により反力としてリンクに伝わり、リンクを目標姿勢に収束するように動かそうとする。リンクに蓄えられた運動エネルギーは時間が経過すると c_a の影響により熱エネルギーとなって消散する。さらに c_a の影響により粘性摩擦力がリンクに伝わり定常誤差を生じる。リンクを運動させた力の反力により蓄積されたリアクションホイールの運動エネルギーは c_r によって消散しようとする。しかし、リンクの角度に定常誤差が生じているため、制御入力によるリアクションホイールの駆動トルクによってエネルギーが補われる。その結果、リアクションホイールは一定速度で回転し続ける。



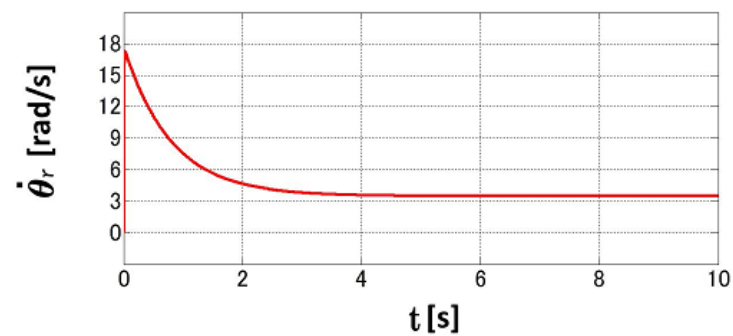
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 3.3: Simulation result with state feedback control (1-link TUM)

この最終的な定常状態で、リンクの回転角度とリアクションホイールの角速度は以下の関係が成り立っている。

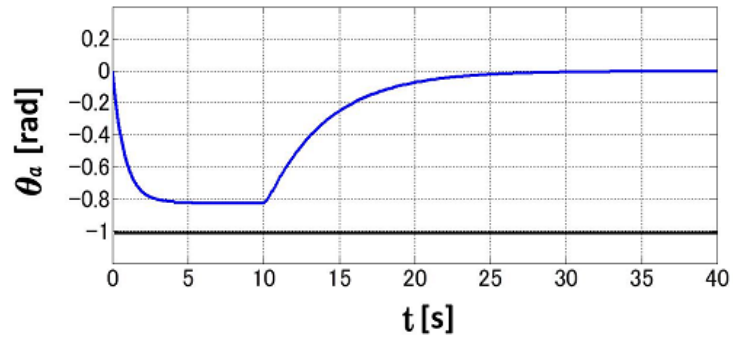
$$\dot{\theta}_{rs} = -\frac{c_a}{J_r}(\theta_{as} - \theta_{a0}) \quad (3.2)$$

ここで、 $\dot{\theta}_{rs}$ は定常状態でのリアクションホイールの角速度、 θ_{as} は定常状態でのリンクの回転角度、 θ_{a0} はリンクの初期姿勢を表す。この定常状態でリアクションホイールの駆動トルクを0にすると、リアクションホイールの回転は減速し、最終的に静止する。しかし、システムは式(3.2)の関係を保ち続けようとし、リンクの回転角度は初期姿勢 θ_{a0} に戻る現象が起きる。

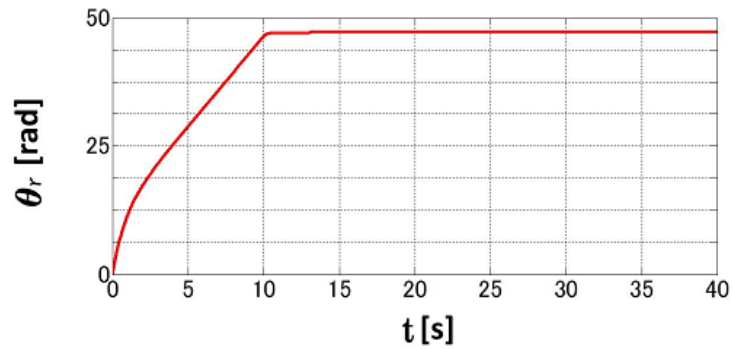
一例として、前述のフィードバック制御により定常状態になっている時刻 $t=10$ に、モータの駆動トルクを0にした数値シミュレーションの結果を図3.4に示す。この結果のとおり、駆動モータの制御トルクがなくなったので、リアクションホイールの回転は静止している。しかしその一方で、リンクの回転角度はフィードバック制御を行う前の初期姿勢に戻っていきることがわかる。

この現象は、以下のとおりに分析できる。駆動モータからのエネルギーの供給がなくなると、リアクションホイールに蓄えられた回転運動のエネルギーは、リンクの姿勢角を変えながら最終的に粘性抵抗により熱エネルギーとなって消散する。その際、リンクの姿勢角はフィードバック制御した際の目標値の近くから、フィードバック制御を行う前の初期姿勢に逆戻りする。

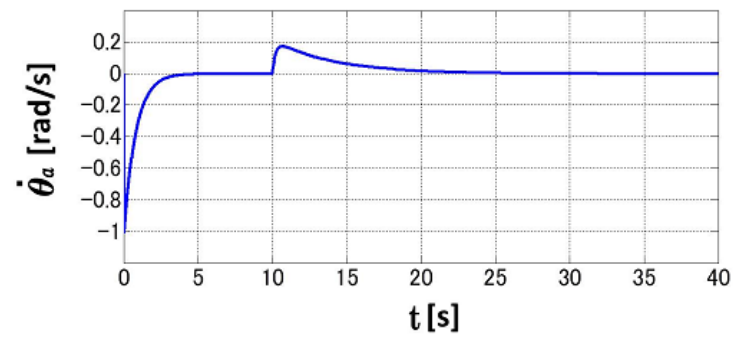
ここで、数学モデルにおいて、リンクとベースの間に働く粘性摩擦を無視して、すなわち $c_a=0$ として、前述の状態フィードバック制御則を用いて数値シミュレーションを行った場合、定常偏差を生じることなくリンクの回転角度は目標値に収束し、リアクションホイールの回転も静止することが確かめられる。よって、リンクとベースの間の粘性摩擦を無視した数学モデルでは前述のアンローディングの問題は起こらない。



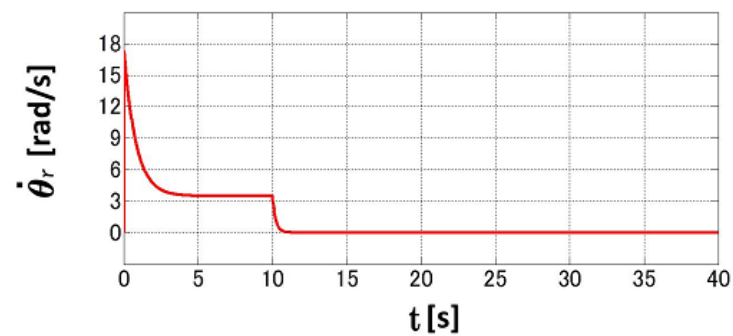
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 3.4: Simulation result after control off (1-link TUM)

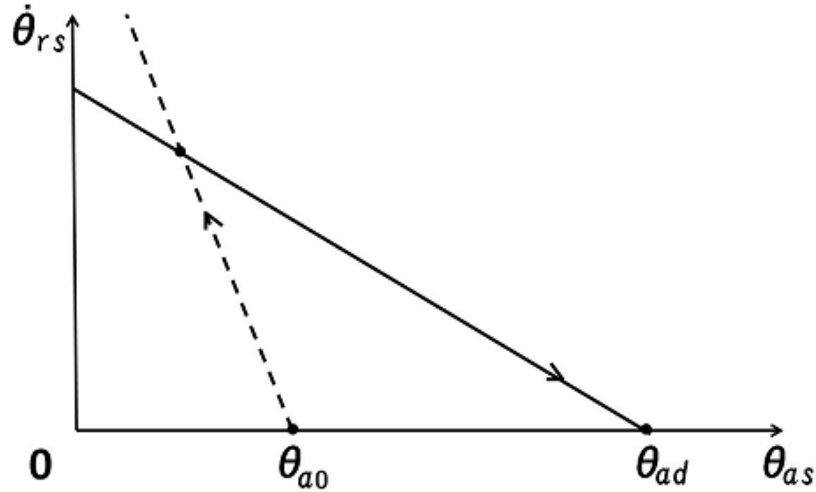


Fig. 3.5: Manifolds for the control method of 1-link TUM

3.4 提案手法を用いた1リンク TUM の姿勢制御

3.4.1 1リンク TUM の制御アルゴリズム

前述したように、式 (3.1) の状態方式は、小型浮遊機械の状態方程式 (2.1) と同じ形をしているので、リンクの姿勢制御に第2章で提案した制御則を適用できると考えられる。以下では、第2章で提案した制御手法を利用して、リンクの姿勢制御を行っていく。ここで、提案手法を適用するには、リンクの回転角度を初期姿勢 θ_{a0} から目標姿勢 θ_{ad} に制御する方法として、リアクションホイールが角速度 $\dot{\theta}_{rs}$ で回転している定常状態において、式 (3.2) における c_a/J_r の値を物理的に変更する機構を考える必要がある。ただし、リアクションホイールを变形可能にして J_r の値を変更すると、角運動量が保たれようとする性質から $\dot{\theta}_{rs}$ の値が変化してしまい、結果的には、駆動モータの発生トルクを 0 にするとリンクの回転角度は、初期値 θ_{a0} に戻ることになる。よって、定常状態において θ_{as} と $\dot{\theta}_{rs}$ の値が変化しない状況で、ベースとリンクの間に働く粘性摩擦係数 c_a の値を変更することにする。ここで、ベースとリンクの間の粘性摩擦係数を変更する方法としては、関節における接触部の状態を機械的に変化させる機構や ER 流体を用いた装置などを利用することが考えられる [37][38]。

定常状態において駆動モータの発生トルクを 0 にしたときに、リンクの回転角度が目標姿勢 θ_{ad} に収束することのできる定常状態の集合は、次の関係式で表される。

$$\dot{\theta}_{rs} = -\frac{c_a}{J_r}(\theta_{as} - \theta_{ad}) \quad (3.3)$$

式(3.3)より図3.5に示すような傾き c_a/J_r の直線(実線)で表すことができる。そこで、リンクの回転角度を初期姿勢から目標姿勢に制御するために、まず、粘性摩擦係数 c_a の値を比較的大きな値 \tilde{c}_a ($\tilde{c}_a > c_a$) に変更する。そして、駆動モータのトルクを発生させて、図3.5の実線上の定常状態になるように制御する。このとき、駆動モータの発生トルクで実現可能な定常状態の θ_{as} と $\dot{\theta}_{rs}$ は次の関係式で表される。

$$\dot{\theta}_{rs} = -\frac{\tilde{c}_a}{J_r}(\theta_{as} - \theta_{a0}) \quad (3.4)$$

この関係式を図3.5に示すと破線で表される。したがって、初めの段階で、駆動モータのトルクを発生させて目指す定常状態は、式(3.3)と式(3.4)で表される2直線の交点Pであり、その値は計算により容易に求められる。

以上のことから次に示す制御アルゴリズムで姿勢制御を行うことでリンクの回転角度を初期姿勢 θ_{a0} から任意の目標姿勢 θ_{ad} に制御することができる。

【1リンク TUM の制御アルゴリズム】

<Step0> 式(3.3)と式(3.4)の交点を求め、 $\dot{\theta}_{rs}$ 、 θ_{as} の値を求める。

<Step1> ベースとリンクの間に働く粘性摩擦係数の値を \tilde{c}_a ($\tilde{c}_a > c_a$) にする。

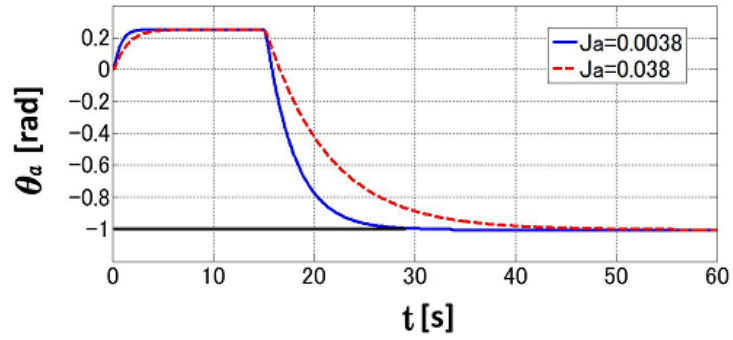
<Step2> 駆動モータのトルクを発生させて、リンクの回転角度が θ_{as} 、リアクションホイールの角速度が $\dot{\theta}_{rs}$ の定常状態になるまで待つ。

<Step3> 定常状態になったら、ベースとリンクの間に働く粘性摩擦係数の値を c_a に変更し、トルクユニットの駆動モータの発生トルクを0にする。□

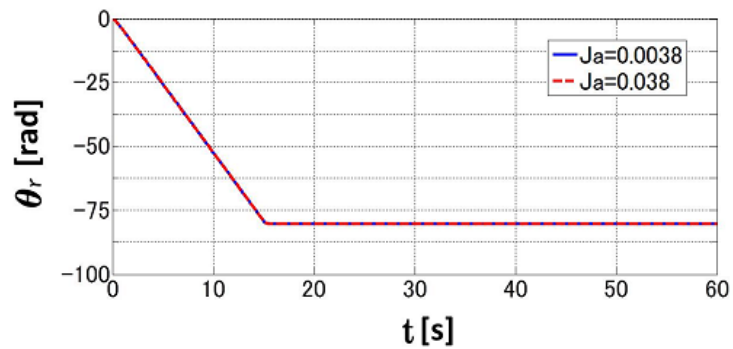
提案手法では、ベースとリンクとの間に働く粘性摩擦係数を変更することを考えている。そのためには、関節における接触部の状態を機械的に変化させる機構やER流体を用いた装置などを利用する必要がある。このような工夫は原理的に実現可能であるが、関節を非駆動とはせずに駆動関節とすることの方がリンクの回転角度の制御は容易である。したがって、制御対象をTUMとして考えた場合は、提案手法の利点について議論の余地がある。しかし、環境との間に直接駆動装置を設けること

ができない状況や、消費エネルギーをできるだけ抑える必要が状況では、本論文で提案する手法の考え方を検討しておくことは重要になると考えられる。

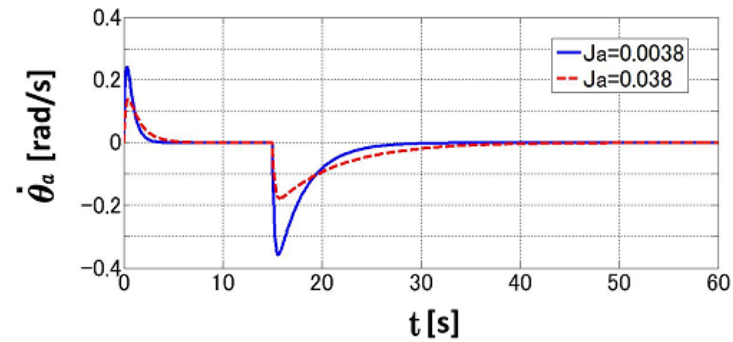
提案手法の有用性の確認のため、リンクの回転角度の初期姿勢を $\theta_{a0}=0$ 、目標姿勢を $\theta_{ad}=-1$ として上記の制御アルゴリズムを適用した数値シミュレーションを行う。まず、ベースとリンクの間に働く粘性摩擦係数を $c_a=0.1$ 、 $\tilde{c}_a=0.5$ として、<Step0>における式(3.3)と式(3.4)の交点を求める。その他のパラメータは表3.1の値を使用する。式(3.3)と式(3.4)にこれらの値を代入すると、目標とする2直線の交点は $P(\dot{\theta}_{rs}, \theta_{as})=(-5.34, 0.25)$ となる。ここで、目標とするリアクションホイールの回転角速度 $\dot{\theta}_{rs}=-5.34$ を出すための制御トルクは、 $\tau_s=c_r\dot{\theta}_{rs}=-5.34 \times 10^{-2}$ である。これらの値を用いて、制御アルゴリズムを適用した数値シミュレーションの結果を図3.6の直線に示す。まず、ベースとリンクの間に働く粘性摩擦係数を \tilde{c}_a にして、トルクユニットのリアクションホイールに制御トルク τ_s を与えて回転させてやると、リンクの回転角度は目標角度である $\theta_{as}=0.25$ で静止することがわかる。そして、定常状態時にベースとリンクの間に働く粘性摩擦係数を c_a に変更し、時刻 $t=15$ でリアクションホイールの制御トルクを0にすると、リンクの姿勢は $t=50$ で目標値である $\theta_{ad}=-1.0$ で静止することがわかる。以上の結果から、提案手法の有用性を確認することができた。



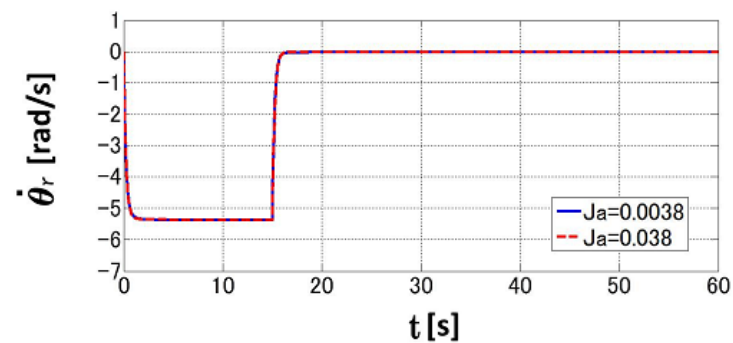
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 3.6: Simulation result with control method of 1-link TUM

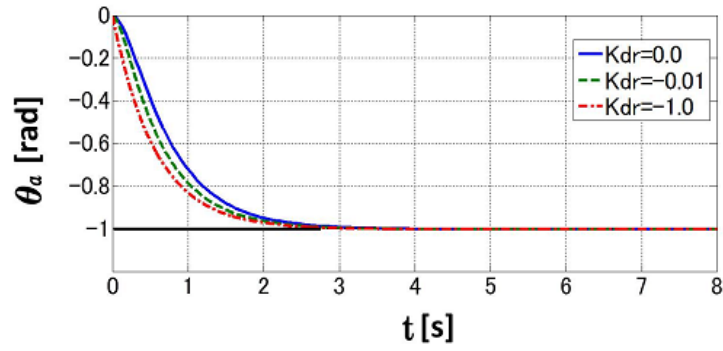
3.4.2 リンクの慣性モーメントの影響

ここで、式(3.3)と式(3.4)より数学モデルにおいて、リンクの回転角度の推移にリンクの慣性モーメントは影響を与えていない。よって、対象とするモデルにおいて、リンクに錘などが乗っていたとしても、提案手法を用いたリンクの姿勢制御には影響を与えないということが推測できる。そこで、【1リンク TUM の制御アルゴリズム】において、リンクの慣性モーメントの値を $J_a = 0.038$ として数値シミュレーションを行った。ここで、リンクの初期姿勢を $\theta_{a0} = 0$ 、目標姿勢を $\theta_{ad} = -1$ とした。その他のパラメータは表3.1の値を使用した。その結果を図3.6の破線で示す。図3.6から見てとれるように、リンクの慣性モーメントの値が大きくなったため、初期状態から定常状態になるまでの時間が長くなっている。しかし、定常状態でのリンクの回転角度は、慣性モーメントの大きさに関わらず同じとなっている。同様に、定常状態からリアクションホイールの制御トルクを0にしてリンクの回転が静止するまでの時間は長くなっている。しかし、最終的なリンクの静止角度は目標姿勢になっていることがわかる。この結果は、提案手法を用いてトルクユニットマニピュレータを制御する場合、トルクユニットマニピュレータはリンクの慣性モーメントの影響を受けないため、搬送装置のようなものに利用するとき、有効な性質を有しているといえる。

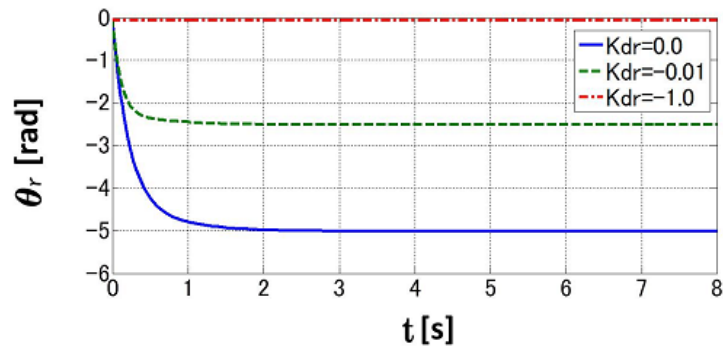
3.4.3 状態フィードバック制御を用いた場合の応答性の変化

【1リンク TUM の制御アルゴリズム】の <Step4> では、リアクションホイールの回転を止めるために、駆動モータの制御トルクを 0 にして、自然に止まるまで待っている。ここで、リアクションホイールの回転を積極的に制御して止めた場合、駆動モータの制御トルクを 0 にするときと比べて、より大きな反力が発生し、リンクが静止するまでの時間が早くなると考えられる。そこで、リアクションホイールの回転をより早く止めるために、リアクションホイールの速度に対する状態フィードバック制御を適用することを試みる。

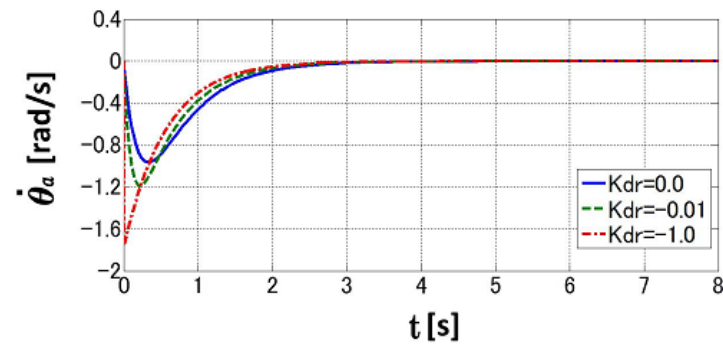
一例として、【1リンク TUM の制御アルゴリズム】の <Step4> において、制御トルクに $\tau = K_{dr}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{2s})$ ($K_{dr} = 0.0, -0.01, -1.0$) を適用したときのリンクの姿勢変化の違いについて数値シミュレーションで確認した。ここで、数値シミュレーションではリンクの初期姿勢を $\theta_{a0} = -1$ [rad] とし、リアクションホイールは角速度 $\dot{\theta}_{r0} = 10$ [rad/s] で回転しているとする。以上の条件で行った数値シミュレーションの結果を図 3.7 に示す。図 3.7 より、リアクションホイールの駆動モータの制御トルクに状態フィードバック制御を適用しても、リンクが目標姿勢に収束する時間は駆動モータの制御トルクを 0 にしたときとほとんど変わらないことが確認できる。よって、制御トルクに状態フィードバックを適用することで、リアクションホイールの回転を早く止めることはできるが、制御の応答性はほとんど変わらないことがわかる。



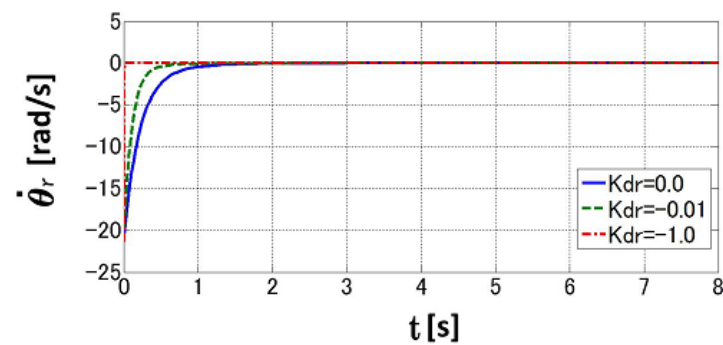
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

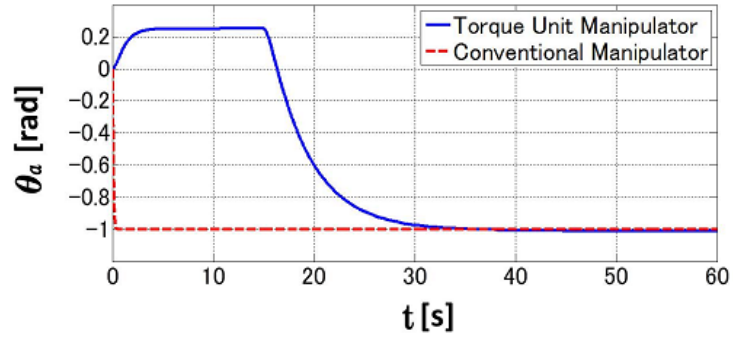
Fig. 3.7: Simulation result with state feedback control (1-link TUM)

3.4.4 姿勢制御で消費されるエネルギー

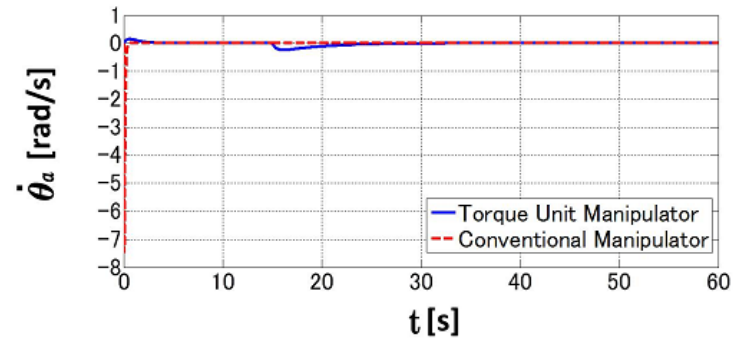
上述してきたように、リンクの慣性モーメントは提案手法を用いた姿勢制御において、リンクの位置決め精度に影響を与えない。よって、制御目標を達成するために目指すべき定常状態でのリンクの姿勢とリアクションホイールの角速度はリンクの質量やリンクの慣性モーメントの大きさが変わっても同じである。このことから、最終的なリンクの目標姿勢が同じであるなら、リンクの慣性モーメントや質量の大きさが変わっても、駆動モータの制御トルクは一定であるといえる。そのため、制御目標を達成するために必要となるエネルギーも、【1リンク TUM の制御アルゴリズム】の <Step4> で駆動モータの制御トルクを 0 にする時間が同じであれば、常に一定となると推測できる。ここで、リンクの関節にモータが取り付けられている従来型のマニピュレータを状態フィードバック制御を用いて制御する場合、リンクの質量や慣性モーメントが大きくなると、駆動モータが消費するエネルギーは大きくなる。そのため、重い荷物などを運搬するようなときは、トルクユニットマニピュレータの方がエネルギーの消費を抑えることができる場合もあると考えられる。

そこで、1リンク TUM を提案手法を用いて制御する場合に必要なエネルギーとリンクの関節にモータが取り付けられている従来型のマニピュレータを状態フィードバック制御によって制御する場合に必要なエネルギーの比較のための数値シミュレーションを行った。リンクの初期姿勢を $\theta_1 = 0$ [rad]、目標姿勢を $\theta_1 = -1$ [rad] として数値シミュレーションを行った。ここで、エネルギーの導出には、駆動モータに与えるトルクが 0 になるまでの時間で制御トルクを積分して、駆動モータの軸が回転する角速度をかけることで求めている。トルクユニットマニピュレータの場合は、リアクションホイールにおける駆動モータの制御トルクを 0 にする時間を 12[s] とし、制御トルクを時間で積分したものにリアクションホイールの角速度をかけることでエネルギーを導出している。従来型のマニピュレータの場合は、リンクが目標姿勢に到達するまでの時間で制御トルクを積分したものにリンクの角速度をかけることでエネルギーを導出している。数値シミュレーションでは、リンクとリアクションホイール間の粘性摩擦係数 c_r の値を $0.05[\text{kgm}^2/\text{s}]$ としている。これは、リンクとリアクションホイール間の粘性摩擦によるエネルギーの損失を少なくするために表 3.1 の値よりも小さな値を使用している。その他のパラメータの値は表 3.1 を用いた。また、制御に必要なエネルギーの比較のために、リンクの質量と慣性モーメントの大きさを変えて数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションの結果を図 3.8 と図 3.9 に示す。図 3.8 はリンクの質量を $m_a=0.806[\text{kg}]$ 、リンクの慣性

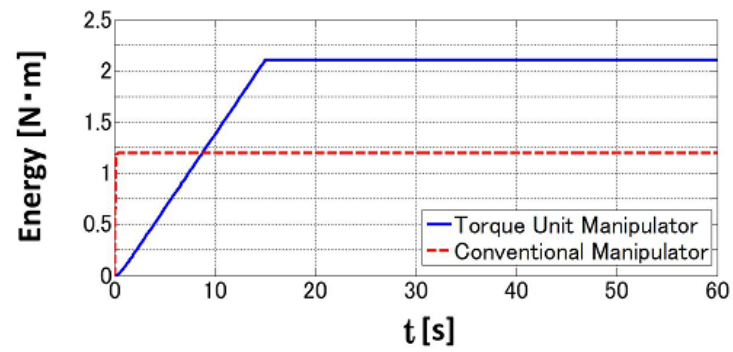
モーメントを $J_a=0.0038[\text{kgm}^2]$ としたときのリンクの回転角度と角速度，駆動モータが消費するエネルギーの時間変化を表したものである．図3.9はリンクの質量を $m_a=2.418[\text{kg}]$ ，リンクの慣性モーメントを $J_a=0.0114[\text{kgm}^2]$ としたときのリンクの回転角度と角速度，駆動モータが消費するエネルギーの時間変化を表したものである．図3.8から見てとれるように，リンクの質量と慣性モーメントが小さいときは，駆動モータが消費するエネルギーは従来型のマニピュレータの方が少ないことがわかる．しかし，図3.9から見てとれるように，リンクの質量と慣性モーメントが大きいときは，トルクユニットマニピュレータの方が駆動モータが消費するエネルギーは少ない．また，リンクの慣性モーメントが大きくなると従来型のマニピュレータは，駆動モータが必要とするエネルギーが増大するが，トルクユニットマニピュレータは変わらないことがわかる．さらに，リンクの慣性モーメントが大きくなると従来型のマニピュレータは，リンクが目標姿勢に収束するときにオーバーシュートを起こすが，トルクユニットマニピュレータは，滑らかに減速して目標姿勢に静止している．これらのことから，リンクを目標姿勢に収束させるまでの時間は従来型のマニピュレータの方が優れているが，重い荷物などを運搬するようなときは，トルクユニットマニピュレータを利用した方がエネルギーの消費を抑えることができ，かつリンクが振動することなく目標姿勢に制御することができるといえる．



(i) Angle of the link

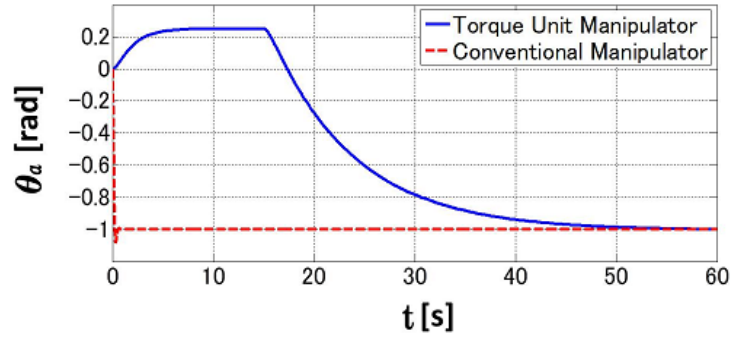


(ii) Angular Velocity of the link

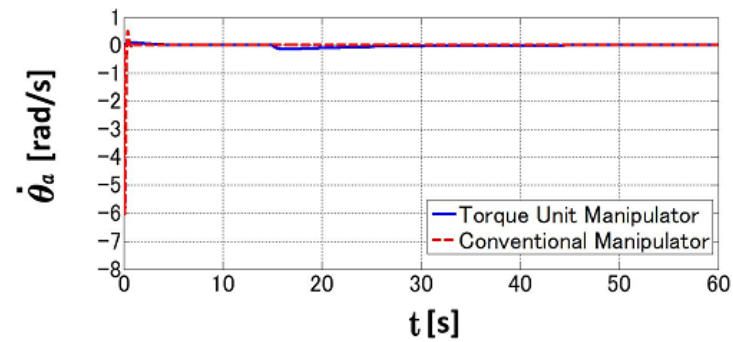


(iii) Energy consumption

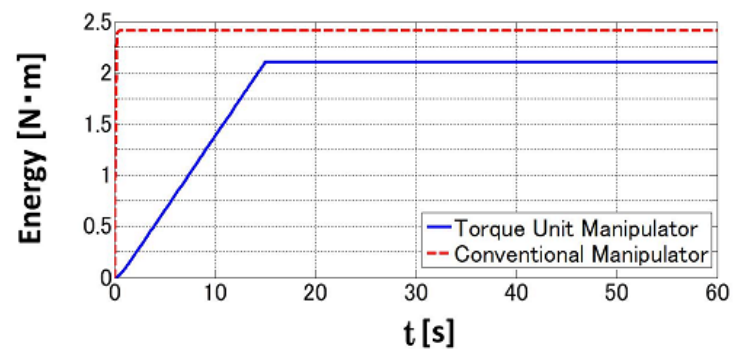
Fig. 3.8: Energy consumption with $J_a=0.0038$



(i) Angle of the link



(ii) Angular Velocity of the link



(iii) Energy consumption

Fig. 3.9: Energy consumption with $Ja=0.076$

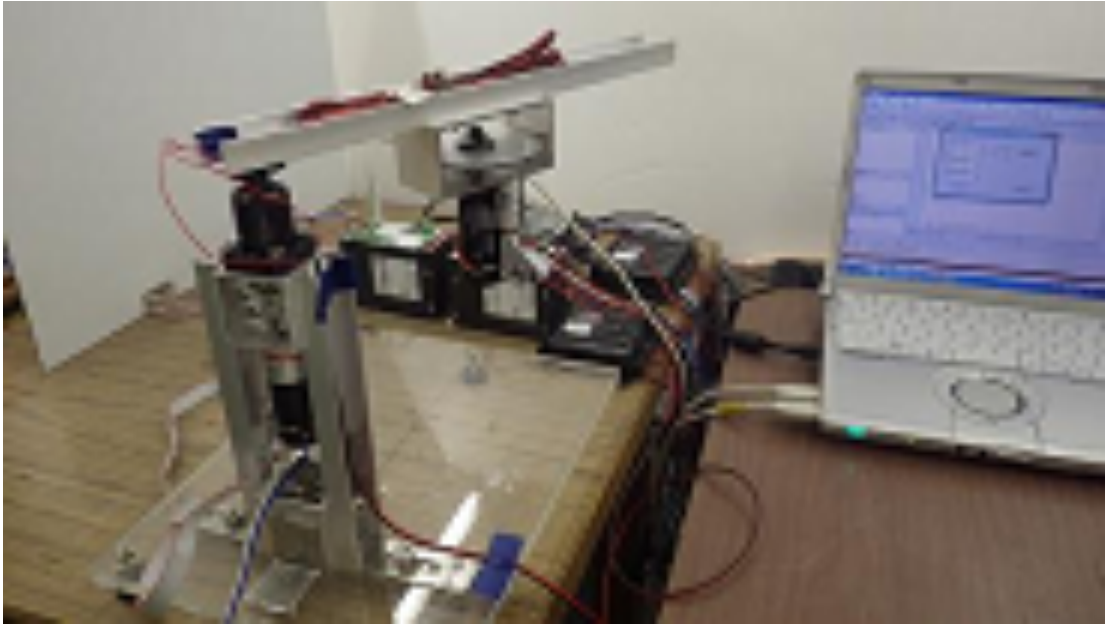


Fig. 3.10: Experimental model of 1-link TUM

3.5 実験装置

3.5.1 実験装置概要

検証実験を行うためために試作した平面 1 リンクトルクユニットマニピュレータを図 3.10 に示す。実験装置にはアクチュエータとしてトルクユニットのリアクションホイールの駆動用に maxon 製の DC モータ (118754, 20[W]) を使用している。さらに、提案手法を実現するためにはリンクの回転軸回りの粘性摩擦を可変にする機構が必要である。そこで本実験では、リンクの回転軸に maxon 製の DC モータ (118754, 20[W]) を取り付け、モータには常に指令電圧 $F_d \dot{\theta}_a$ (F_d : 定数) を与えることを考える。これにより、リンクの回転軸に粘性摩擦が働いているときと同様の抵抗力を擬似的に作り出すことができる。また、リンクの回転角度を検出するために、リンクの回転軸に取り付けてあるモータにはエンコーダを取り付けてある。リンクには長さ 300 [mm] のアルミ材を使用している。トルクユニットのリアクションホイールには直径 70 [mm], 厚さ 3 [mm] のアルミ複合板で製作した円盤を使用している。

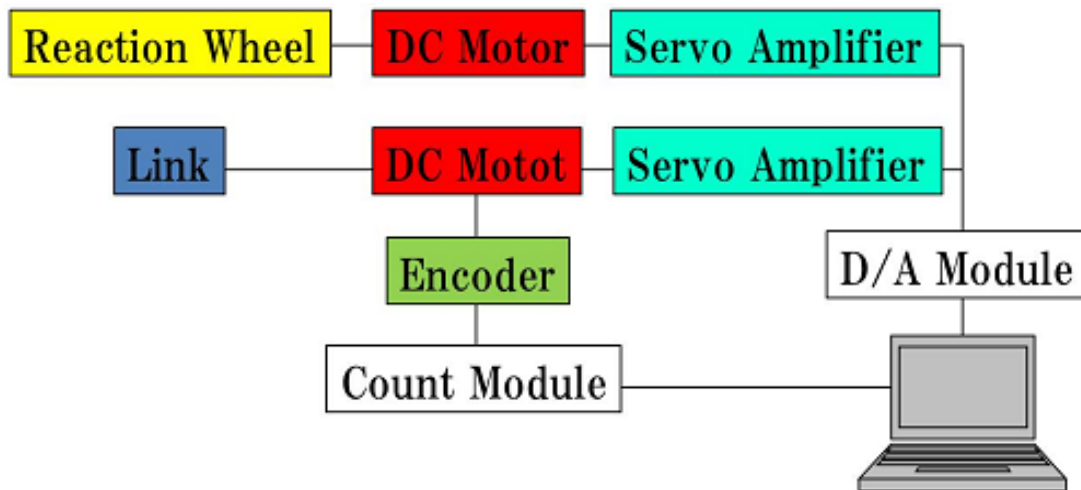


Fig. 3.11: System structure of 1-link TUM

3.5.2 システム構成

実験モデルの制御システム構成を図3.11に示す。システムの流れは以下のようになる。まず、パソコンからリアクションホイールが式(3.1)を満たす角速度 $\dot{\theta}_r$ で回転するために必要な指令電圧が出力される。次に、この指令電圧はD/Aモジュールを介してD/A変換され、速度制御に設定されたサーボアンプへ入力される。サーボアンプは、入力された指令電圧に応じた回転速度でモータが回転するために必要な電力を出力し、リアクションホイールが回転する。そして、リアクションホイールが回転することによって生じる反作用のトルクにより、リンクが動き始める。

3.6 検証実験

本実験装置を用いて、トルクユニットで駆動する平面 1 リンクマニピュレータにおける粘性摩擦の影響を確認し、さらに提案手法の実施可能性を検証する。

3.6.1 粘性摩擦の切り替えによる姿勢変化の確認

まず、リンクの回転軸に大きな粘性摩擦を与えた状態で、リンクの初期姿勢角度を $\theta_{a0} = 0$ [deg] とする静止状態から、トルクユニットに指令電圧 $u = 1.0$ [V] を加えてリアクションホイールを定常状態になるまで回転させる。そして、定常状態になった後、6 [s] の時点でリアクションホイールの回転を止める。この実験の結果は図 3.12 の実線で表される。この結果から、定常状態になったときにリアクションホイールの回転を止めると、リンクの姿勢はほぼ初期姿勢に戻ることが確認できた。また、同じ手順で行った実験で、定常状態においてリンクの回転軸に働く粘性摩擦を小さく変更してからリアクションホイールの回転を止めた場合の実験の結果を図 3.12 の破線に示す。この結果から、モータの回転軸に生じている抵抗力（粘性摩擦力）の大きさを変えてやるとリンクの姿勢は初期位置ではなく -45 [deg] の位置で静止することが確認できた。

3.6.2 トルクユニットの指令電圧とリンクの姿勢角度の関係

次に、リンクの回転軸に大きな粘性摩擦を与えた状態で、リンクの初期姿勢を $\theta_{a0} = 0$ [deg] とする静止状態から、トルクユニットに指令電圧 $u = 0.8$ [V] を加えてリアクションホイールを回転させて定常状態になるまでの実験を行った。この実験の結果を図 3.13 の破線に示す。この結果から、トルクユニットに指令電圧 $u = 0.8$ [V] を加えると、リアクションホイールが一定の角速度で回転する定常状態になるまでに、リンクの姿勢は約 35 [deg] 変化して静止することが分かった。ところで数学モデルでは、トルクユニットへの指令電圧、駆動モータの発生トルク、定常状態におけるリアクションホイールの角速度、リンクの姿勢の変化量は、すべて比例するものと仮定している。そこで、 $\tau_s = Fu = c_r \dot{\theta}_{r,s}$ の関係を考慮すると、図 3.12 の結果と合わせて、リンクの回転軸に働く粘性摩擦が大きい状態で、トルクユニットへの指令電圧に対するリンクの姿勢角度の変化量に係る比例定数は、約 -0.02 と見積もることができる。

さらに、リンクの回転軸に働く粘性摩擦が小さい状態で、リンクの初期姿勢を $\theta_{a0} = 0$ [deg] とする静止状態から、トルクユニットに指令電圧 $u = 0.8$ [V] を加えてリアクションホイールを回転させて定常状態になるまでの実験を行った。この実験の結果を図 3.13 の実線に示す。この結果から、トルクユニットに指令電圧 $u = 0.8$ [V] を加えると、リアクションホイールが一定の角速度で定常状態になるまでに、リンクの姿勢は約 72 [deg] 変化して静止することが分かった。よって、リンクの回転軸に働く粘性摩擦が小さい状態では、トルクユニットへの指令電圧に対するリンクの姿勢の変化量に係る比例定数は、約-0.01 と見積もることができる。

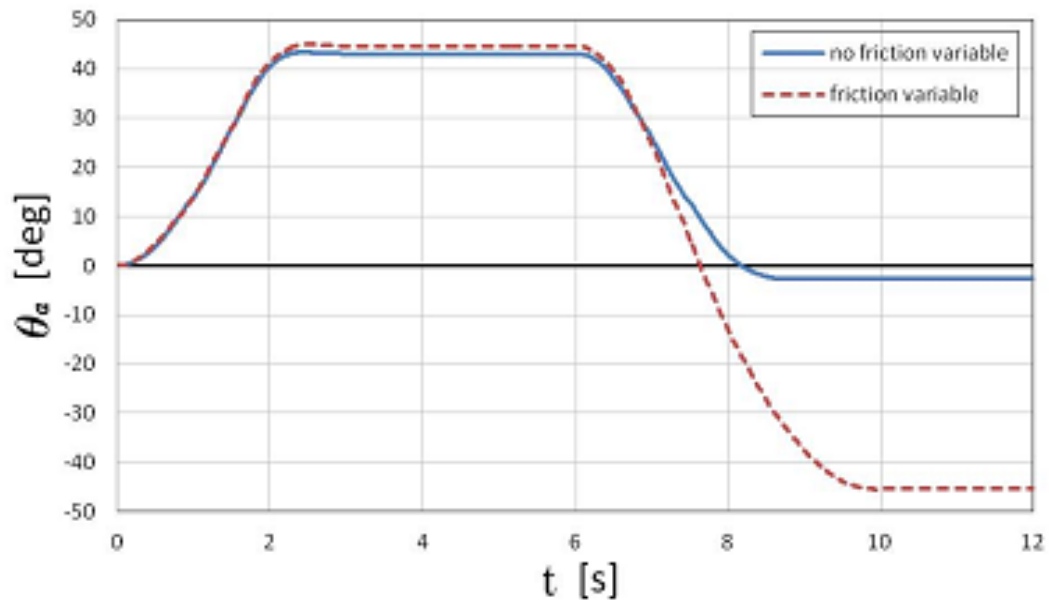


Fig. 3.12: Step response with $u = 1.0$ [V]

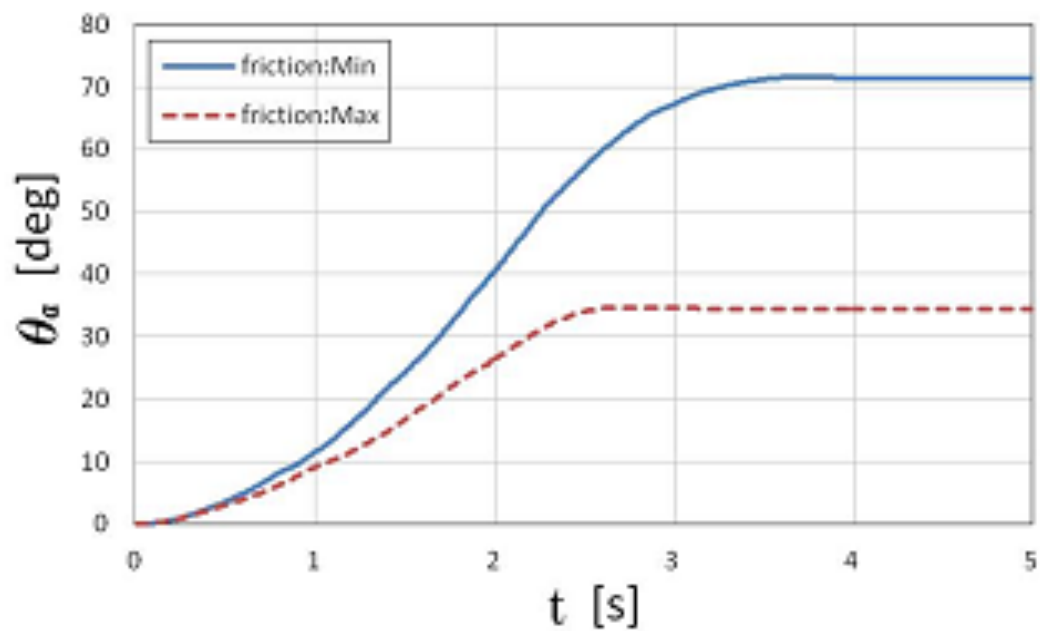


Fig. 3.13: Step response with $u = 0.8$ [V]

3.6.3 提案手法を適用した実験の結果

以上の実験データをもとに、リンクの初期姿勢を $\theta_{a0} = 60$ [deg]、目標姿勢を $\theta_{ad} = 0$ [deg] として、提案手法の適用を試みる。リンクの回転軸に働く粘性摩擦が大きい場合と小さい場合それぞれにおけるトルクユニットの指令電圧とリンクの回転角度の関係はそれぞれ次式で表される。

$$u = -0.02(\theta_{as} - \theta_{a0}) \quad (3.5)$$

$$u = -0.01(\theta_{as} - \theta_{ad}) \quad (3.6)$$

式(3.5)、式(3.6)からリンクを 60 [deg] 回転させるのに必要な定常状態におけるトルクユニットの駆動トルクとリンクの回転角度は、図3.14の交点 $P(u, \theta_{as}) = (-1.2, 120)$ である。

提案手法を適用した制御実験の結果を図3.15に示す。リンクの回転軸に大きな粘性摩擦を与えている状態でトルクユニットに指令電圧 -1.2 [V] を加えると、リンクが初期姿勢 60 [deg] から目標姿勢の 120 [deg] 近くで静止していることがわかる。そして、時刻 6 [s] でリンクの回転軸に働く粘性摩擦を小さく変更してからリアクションホイールの回転を止めると、リンクの姿勢は目標値の 0 [deg] 近くで静止していることがわかる。以上の結果から、提案手法による制御の実施可能性を確認することができた。

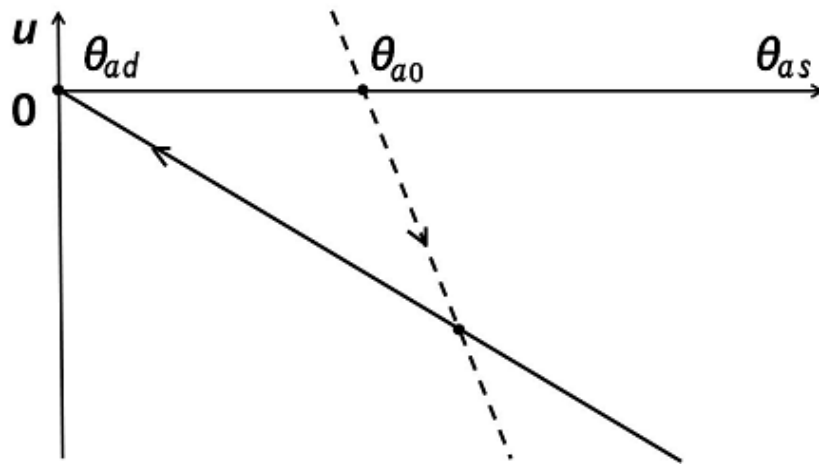


Fig. 3.14: Manifolds for the control experiment of 1-link TUM

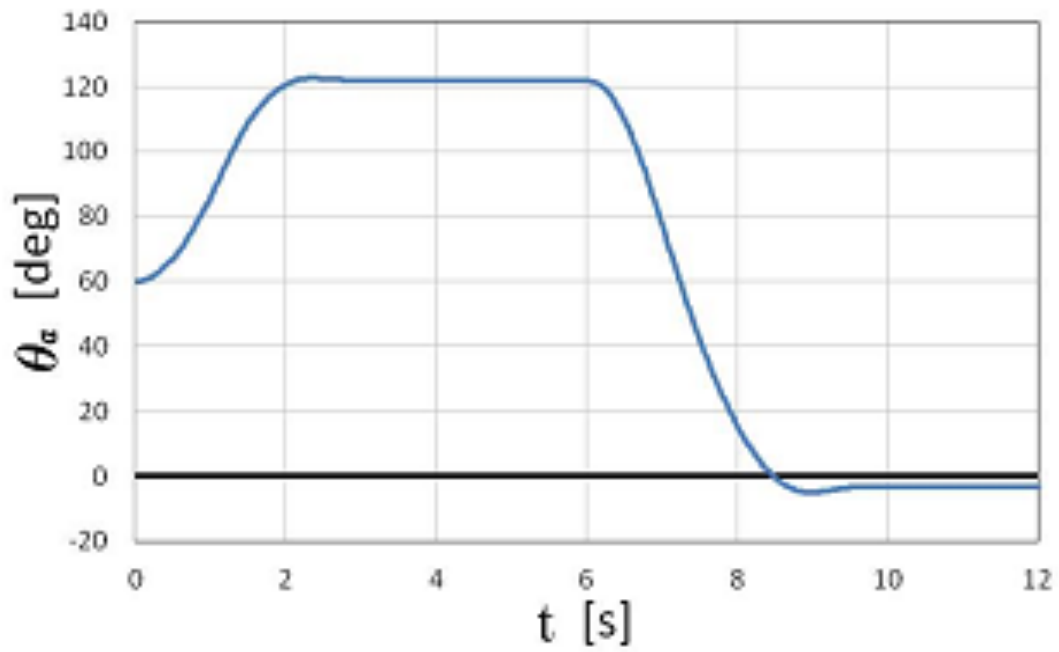


Fig. 3.15: Control experiment with the proposed method of 1-link TUM

第4章 2リンクTUMの姿勢制御

以下では，第2章と第3章で得られた知見を基に，各リンクにトルクユニットが1機ずつ取り付けられている平面2リンクTUMを対象に，すべてのリンクとリアクションホイールが角速度0で静止している初期状態から，それぞれのリンクが任意の目標姿勢で静止し，そのときリアクションホイールの角速度がそれぞれ0となる目標状態に制御する手法を提案する．そして，数値シミュレーションにより提案手法の有用性を確認する．ここでは，粘性摩擦の影響を考慮したTUMの理論的な姿勢制御の可能性を確認することを主要な目的としている．

4.1 2リンクTUMの数学モデル

地面に固定されたベースと回転関節でつながっている2リンクマニピュレータが，図4.1に示すように水平面内を回転するモデルを考える．リンクの関節はすべて非駆動関節となっており，各リンクにトルクユニットが1機ずつ装着されている．また，リンクの回転角度を計測するために，例えば，エンコーダなどのセンサが各リンクの回転軸に取り付けてあるものとする．ここで， $i = 1, 2$ として図4.1に示すとおり， m_{ai} をリンクの質量， J_{ai} をリンクの重心回りの慣性モーメント， r_{ai} をリンクの関節からリンクの重心までの距離， m_{ri} をリアクションホイールの質量， J_{ri} をリアクションホイールの慣性モーメント， l_{ri} をリンクの関節からリアクションホイールの回転軸までの距離， θ_{ai} をリンクの回転角度， θ_{ri} をリアクションホイールの回転角度， c_{ai} をリンクの回転軸に働く粘性摩擦係数， c_{ri} をリアクションホイールにおける駆動モータの回転軸に働く粘性摩擦係数， τ_i をリアクションホイールにおける駆動モータが発生する制御トルクとおく．ここでは，トルクユニット内の駆動モータは質点であるとみなし，直接制御トルクをリアクションホイールに与えることができるものとしている．また，アンプを介して指令電圧に比例する制御トルクを発生できる直流サーボモータとする．なお，空気抵抗については考慮しない．以上の仮定のもとで運動方程式を導くと以下のようなになる [39].

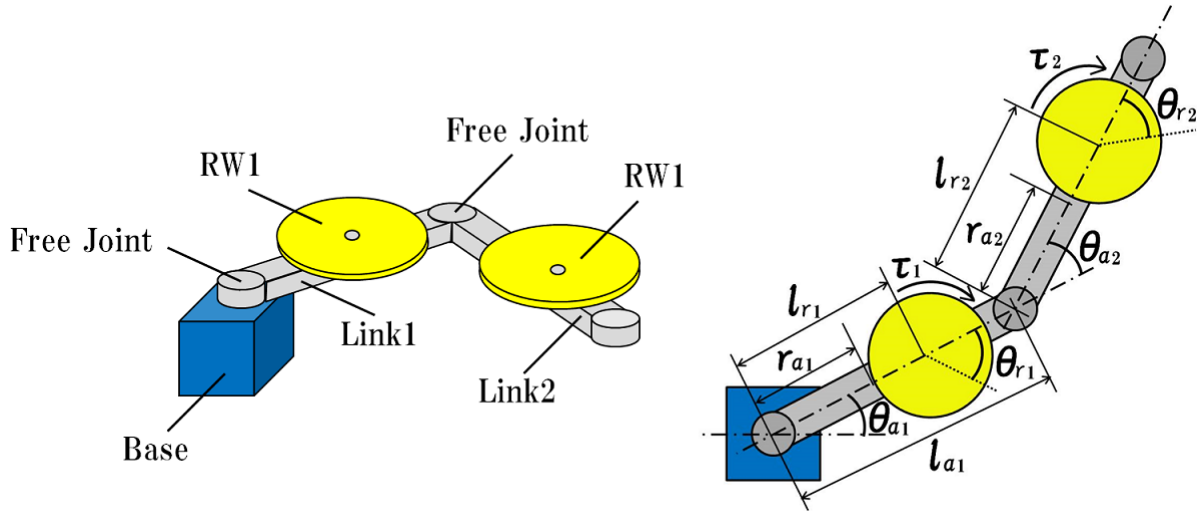


Fig. 4.1: 2-Link TUM

$$\begin{aligned}
 & (J_1 + 2J_3 \cos \theta_{a2})\ddot{\theta}_{a1} + (J_2 + J_3 \cos \theta_{a2})\ddot{\theta}_{a2} + J_{r1}\ddot{\theta}_{r1} + J_{r2}\ddot{\theta}_{r2} \\
 & \quad - J_3\dot{\theta}_{a2}(2\dot{\theta}_{a1} + \dot{\theta}_{a2}) \sin \theta_{a2} + c_{a1}\dot{\theta}_{a1} = 0
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$(J_2 + J_3 \cos \theta_{a2})\ddot{\theta}_{a1} + J_2\ddot{\theta}_{a2} + J_{r2}\ddot{\theta}_{r2} + J_3 \sin \theta_{a2}\dot{\theta}_{a1}^2 + c_{a2}\dot{\theta}_{a2} = 0 \tag{4.2}$$

$$J_{r1}\ddot{\theta}_{a1} + J_{r1}\ddot{\theta}_{r1} + c_{r1}\dot{\theta}_{r1} = \tau_1 \tag{4.3}$$

$$J_{r2}\ddot{\theta}_{a1} + J_{r2}\ddot{\theta}_{a2} + J_{r2}\ddot{\theta}_{r2} + c_{r2}\dot{\theta}_{r2} = \tau_2 \tag{4.4}$$

$$\begin{pmatrix} J_1 = m_{a1}r_{a1}^2 + J_{a1} + m_{a2}(l_{a1}^2 + r_{a2}^2) + J_{a2} + m_{r1}l_{r1}^2 + J_{r1} + m_{r2}(l_{a1}^2 + l_{r2}^2) + J_{r2} \\ J_2 = m_{a2}r_{a2}^2 + J_{a2} + m_{r2}l_{r2}^2 + J_{r2} \\ J_3 = m_{a2}l_{a1}r_{a2} + m_{r2}l_{a1}l_{r2} \end{pmatrix}$$

式(4.1)～式(4.4)より，リンクとリアクションホイールの回転角度を $\mathbf{x} = [\theta_{a1} \ \theta_{a2} \ \theta_{r1} \ \theta_{r2}]^T$ とおくと，運動方程式は以下のように表せる．

$$J(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}} + H(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \boldsymbol{\tau} \tag{4.5}$$

ここで，

$$J(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} J_1 + 2J_3 \cos \theta_{a2} & J_2 + J_3 \cos \theta_{a2} & J_{r1} & J_{r2} \\ J_2 + J_3 \cos \theta_{a2} & J_2 & 0 & J_{r2} \\ J_{r1} & 0 & J_{r1} & 0 \\ J_{r2} & J_{r2} & 0 & J_{r2} \end{bmatrix},$$

$$H(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} -J_3(2\dot{\theta}_{a1}\dot{\theta}_{a2} + \dot{\theta}_{a2}^2) \sin \theta_{a2} + c_{a1}\dot{\theta}_{a1} \\ J_3\dot{\theta}_{a1}^2 \sin \theta_{a2} + c_{a2}\dot{\theta}_{a2} \\ c_{r1}\dot{\theta}_{r1} \\ c_{r2}\dot{\theta}_{r2} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

Table 4.1: Physical parameters for 2-link TUM

parameter	symbol($i=1,2$)	value
The mass of the link	m_{ai}	0.5 [kg]
The mass of the reaction wheel	m_{ri}	0.2 [kg]
The length of the link	l_{ai}	0.3 [m]
The distance to center of rotation of the reaction wheel from the joint of the link	l_{ri}	0.15 [m]
The distance to the center of mass of the link from the joint of the link	r_{ai}	0.15 [m]
The moment of inertia of the link	J_{ai}	0.01 [kgm ²]
The moment of inertia of the reaction wheel	J_{ri}	0.05 [kgm ²]
The viscous friction coefficient of the link axis	c_{ai}	0.5 [kgm ² /s]
The viscous friction coefficient on the motor axis of the reaction wheel	c_{ri}	0.1 [kgm ² /s]

4.2 2リンク TUM の姿勢制御問題

以下では、平面2リンク TUM において、すべてのリンクとリアクションホイールが角速度0で静止している状態を初期状態とし、それぞれのリンクが任意の目標姿勢で静止し、そのときリアクションホイールの角速度がそれぞれ0となる状態に制御することを制御目標とする。その際、それぞれのリアクションホイールの回転角度は、どのような値であっても構わないとする。

まずはじめに、TUM を目標状態に制御するため、簡単な非線形フィードバック制御を適用することで制御目標を達成できないか試みた。一例として、リンクとリアクションホイールの初期姿勢を $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 、目標姿勢を $\mathbf{x}_d = [-1 \ -1 \ \theta_{r1d} \ \theta_{r2d}]^T$ (θ_{r1d} , θ_{r2d} は適当な定数) として、リアクションホイールにおける駆動モータが発生する制御トルクを以下のようにおいて数値シミュレーションを行った。

$$\boldsymbol{\tau}_n = D(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + M(\mathbf{x})F_a(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + F_r(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) \quad (4.6)$$

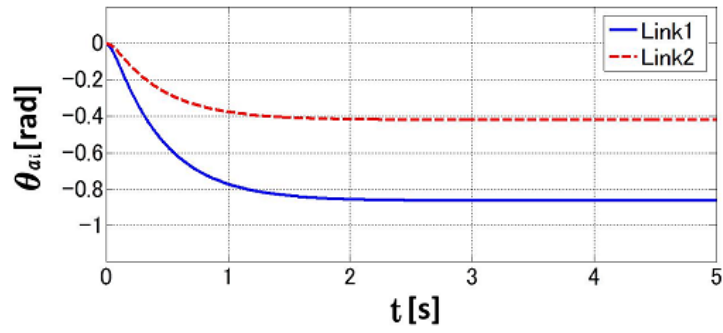
ここで、

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\tau}_n &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, M(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ M_2 & M_3 \end{bmatrix}, D(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix}, \\
 F_a(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) &= \begin{bmatrix} K_p(\theta_{a1} - \theta_{a1d}) + K_d(\dot{\theta}_{a1} - \dot{\theta}_{a1d}) \\ T_p(\theta_{a2} - \theta_{a2d}) + T_d(\dot{\theta}_{a2} - \dot{\theta}_{a2d}) \end{bmatrix}, \\
 F_r(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) &= \begin{bmatrix} F_p(\theta_{r1} - \theta_{r1d}) + F_d(\dot{\theta}_{r1} - \dot{\theta}_{r1d}) \\ U_p(\theta_{r2} - \theta_{r2d}) + U_d(\dot{\theta}_{r2} - \dot{\theta}_{r2d}) \end{bmatrix}, \\
 \left(\begin{array}{l} D_1 = -m_{a2}l_{a1}r_{a2} \sin \theta_{a2}(2\dot{\theta}_{a1} + \dot{\theta}_{a2}) + c_{a1}\dot{\theta}_{a1} \\ D_2 = m_{a2}l_{a1}r_{a2} \sin \theta_{a2}\dot{\theta}_{a1}^2 + c_{a2}\dot{\theta}_{a2} \\ M_1 = M_3 + J_{a1} + m_{a2}r_{a1}^2 + m_{a2}l_{a1}^2 + 2m_{a2}l_{a1}r_{a2}\cos \theta_{a2} \\ M_2 = M_3 + m_{a2}l_{a1}r_{a2} \cos \theta_{a2} \\ M_3 = J_{a2} + m_{a2}r_{a2}^2 \\ \left[\begin{array}{cccccccc} K_p & K_d & T_p & T_d & F_p & F_d & U_p & U_d \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccccccc} 10 & 1 & 100 & 1 & 0 & -0.5 & 0 & -0.2 \end{array} \right] \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

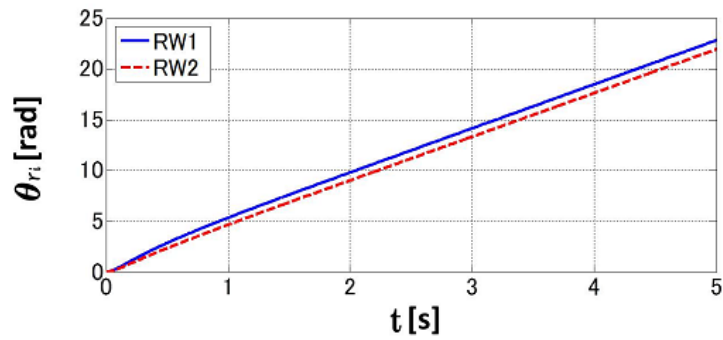
である．式(4.6)は，運動方程式 $M(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{x}} + D(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) = \boldsymbol{\tau}_n$ であらわされる関節に駆動力を持つ平面2リンクマニピュレータに対して用いる一般的な非線形状態フィードバック制御則 $\boldsymbol{\tau}_n = D(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + M(\mathbf{x})F_a(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ に，リアクションホイールの姿勢と角速度のフィードバック項を加えたものである．ここで，それぞれのリアクションホイールの回転角度に対しては，目標値が定まらないので，ゲインを0にしている．数値シミュレーションで使用したパラメータは表4.1を用いた．パラメータの値はシステムの挙動が分かり易いように適当な値を使用した．数値シミュレーションの結果を図4.2に示す．

この結果から，それぞれのリアクションホイールが回転するとリンクはそれぞれ初期姿勢から目標姿勢に向かって動くが，時間が経つと定常誤差を残して静止することが分かる．また，そのときリアクションホイールはそれぞれ一定の角速度で回転し続けていることが分かる．

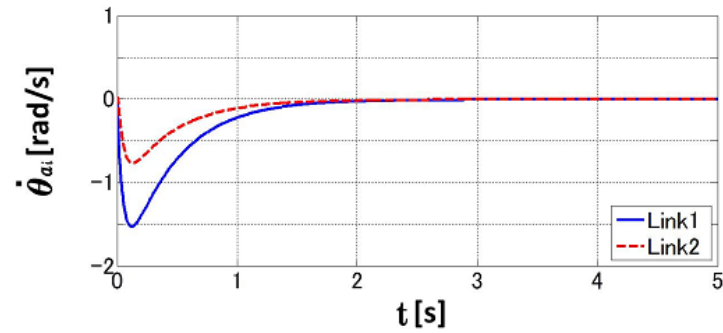
最終的な定常状態において，リアクションホイールが一定の角運動量を保有し，エネルギーを消費し続ける状況は制御系として好ましくない．また，姿勢制御を繰り返す行くと，リアクションホイールに残留する角運動量が増大する可能性があり，駆動モータの制御トルクには限界があるため姿勢の変更に制限が生じる．そのため，この角運動量の残留を解消（アンローディング）するための方法を考える必要がある．



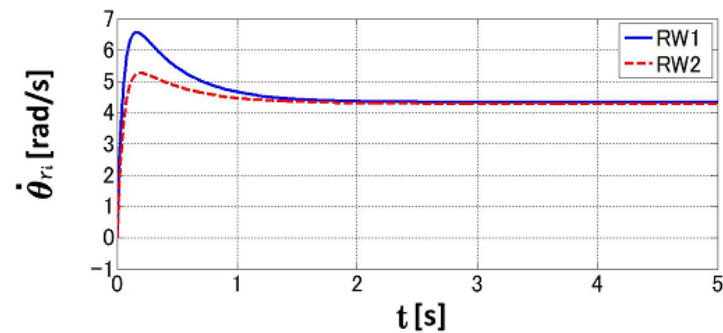
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 4.2: Simulation result with a nonlinear feedback control

この定常状態において、リンクの回転角度とリアクションホイールの角速度の関係は、式(4.1)、式(4.2)の両辺を初期時刻 t_0 から定常状態に達する時刻 t_s まで時間積分することで次のように表すことができる。

$$J_{r1}\dot{\theta}_{r1s} + J_{r2}\dot{\theta}_{r2s} = -c_{a1}(\theta_{a1s} - \theta_{a10}) \quad (4.7)$$

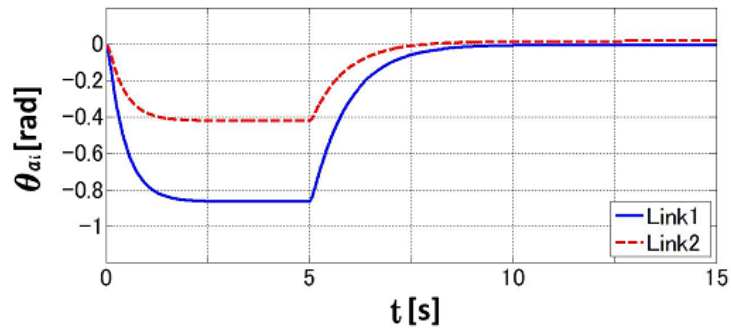
$$-J_3 \left(\int_{t_0}^{t_s} \sin \theta_{a2} \dot{\theta}_{a1}^2 dt + \int_{t_0}^{t_s} \sin \theta_{a2} \dot{\theta}_{a1} \dot{\theta}_{a2} dt \right) - J_{r2}\dot{\theta}_{r2s} = c_{a2}(\theta_{a2s} - \theta_{a20}) \quad (4.8)$$

ただし、 θ_{a10} と θ_{a20} は初期状態でのリンクの回転角度、 θ_{a1s} と θ_{a2s} は定常状態でのリンクの回転角度、 $\dot{\theta}_{r1s}$ と $\dot{\theta}_{r2s}$ は定常状態でのリアクションホイールの角速度である。式(4.7)より、定常状態におけるリンク1の回転角度 θ_{a1s} は、それぞれのリアクションホイールが定常状態で保有する角運動量の和によって決まることが分かる。また、式(4.8)より、定常状態におけるリンク2の回転角度 θ_{a2s} は、リンク2の上にあるリアクションホイールRW2が定常状態で保有する角運動量の値と、初期状態から定常状態に達するまでのリンク1とリンク2の運動の過程によって決まることが分かる。なお、定常状態でのリアクションホイールにおける駆動モータの制御トルクは $\tau_{1s} = c_{r1}\dot{\theta}_{r1s}$ 、 $\tau_{2s} = c_{r2}\dot{\theta}_{r2s}$ となっている。

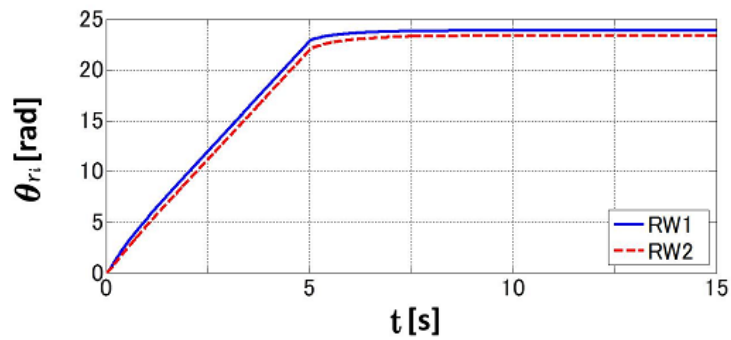
ここで、前述の数値シミュレーションにおいて、状態フィードバック制御で定常状態になっている時刻 $t = 5$ [s]に、リアクションホイールにおける駆動モータの制御トルクをそれぞれ0にしてみた。この数値シミュレーションの結果を図4.3に示す。図4.3-(ii)(iv)の結果から、それぞれの駆動モータの制御トルクをそれぞれ0にしたため、リアクションホイールの回転はそれぞれの駆動モータの回転軸に働く粘性摩擦の影響によって静止する。一方、駆動モータの回転軸に働く粘性摩擦により生じる力がそれぞれのリンクに伝わり、初期姿勢に戻る方向に動き出すことが図4.3-(i)(iii)の結果から分かる。そして、リンクの回転軸に働く粘性摩擦の影響でそれぞれのリンクは減速して静止する。駆動モータの制御トルクが0となり、それぞれのリアクションホイールの保有する角運動量が0になるとき、最終的なリンク1の静止位置は、式(4.7)の関係どおり初期回転角度0 [rad]となることが確認できる。また、最終的なリンク2の静止位置は、式(4.8)左辺の積分項の値から決まる姿勢で静止している。

この数値シミュレーションの結果から、リアクションホイールにおける駆動モータの制御トルクを工夫することで、リンク1の姿勢を変えることなくリンク2の姿勢のみ変化できることが分かる。よって、初期状態から目標状態になるまでのリンクの運動を計画することができれば、リンク2の姿勢を任意の姿勢に制御できる可能

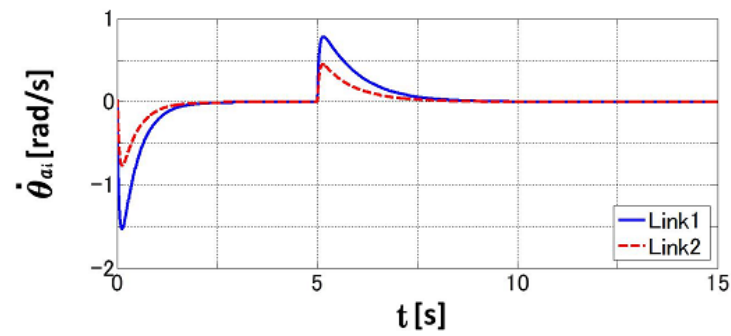
性がある。しかし、定常状態におけるリンク1の回転角度とそれぞれのリアクションホイールが保有する角運動量は、式4.(7)の関係を常に満たしているため、それぞれのリアクションホイールのアンローディングを行うとリンク1は初期回転角度で静止する。また、リンク2を任意の姿勢で静止させるには、式(4.8)の関係よりリンクの運動の過程を知る必要がある。しかし、初期状態から最終的な静止状態に達するまでのリンクの運動の過程をあらかじめ求めておくことは現実的には難しい。以下では、第2章と第3章で提案した手法を利用して、リンク1とリンク2を目標姿勢に制御する手法を提案する。



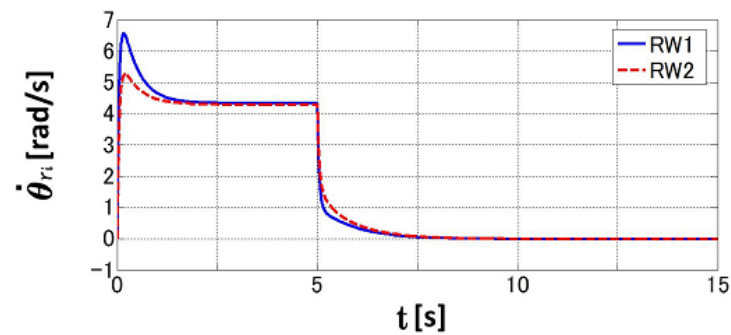
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 4.3: Simulation result after control off (2-link TUM)

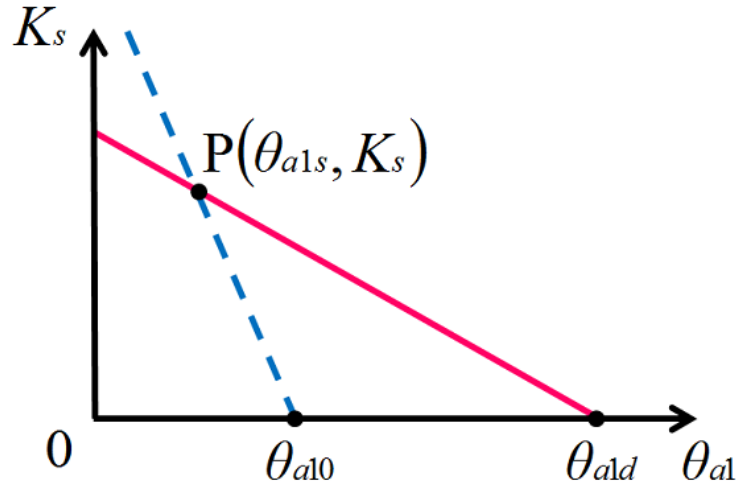


Fig. 4.4: Manifolds for the control method of the first link

4.3 リンクの目標姿勢への制御方策

4.3.1 粘性摩擦を利用したリンク1の姿勢制御

式(4.7)より、定常状態でそれぞれのリアクションホイールが保有する角運動量の和を $K_s = J_{r1}\dot{\theta}_{r1s} + J_{r2}\dot{\theta}_{r2s}$ とおいたとき、 K_s とリンク1の回転角度 θ_{a1s} の間には以下の式で表される直線関係があることが分かる。

$$K_s = -c_{a1}(\theta_{a1s} - \theta_{a10}) \quad (4.9)$$

この関係は図4.4の破線で表される。2章と3章より、式(4.9)の関係を満たす定常状態において、リンク1の回転軸に働く粘性摩擦係数を \tilde{c}_{a1} ($\tilde{c}_{a1} < c_{a1}$) に変更すると、それぞれのリアクションホイールが保有する角運動量の和 K_s とリンク1の回転角度 θ_{a1s} には次の関係式が成り立つ。

$$K_s = -\tilde{c}_{a1}(\theta_{a1s} - \theta_{a1d}) \quad (4.10)$$

式(4.10)の関係は図4.4の実線で表される。この式(4.10)の関係が成り立っている状態で、リアクションホイールにおける駆動モータの制御トルクをそれぞれ0にすると、リンク1は初期姿勢 θ_{a10} ではなく θ_{a1d} で静止することとなる。そこで、この最終的なリンク1の静止回転角度 θ_{a1d} を目標姿勢となるように制御を行う。したがって、

θ_{a1d} をリンク1の目標姿勢とするために目指すべき定常状態は、式(4.9)と式(4.10)の交点Pである。

以上より、次の制御アルゴリズムを適用することにより、リンク1の回転角度を任意の初期姿勢 θ_{a10} から任意の目標姿勢 θ_{a1d} に制御することができる。

【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】

<Step0> 式(4.9)と式(4.10)の交点を求め、 K_s , θ_{a1s} の値を求める。

<Step1> リンク1の回転軸に働く粘性摩擦係数の値を c_{a1} ($\tilde{c}_{a1} < c_{a1}$) にする。

<Step2> それぞれの駆動モータに制御トルクを発生させて、リンク1の回転角度 θ_{a1s} とそれぞれのリアクションホイールが保有する角運動量の和 K_s が式(4.9)の関係を満たす定常状態になるまで待つ。

<Step3> 定常状態になったら、リンク1の回転軸に働く粘性摩擦係数の値を \tilde{c}_{a1} ($\tilde{c}_{a1} < c_{a1}$) に変更し、駆動モータの制御トルクをそれぞれ0にする。

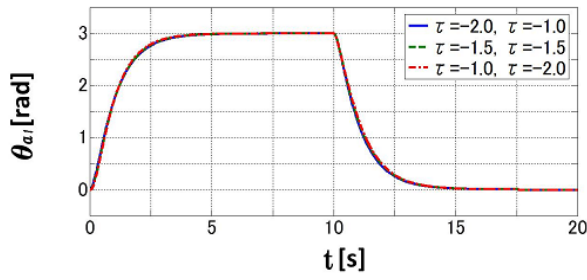
ここで、リンク1の回転軸に働く粘性摩擦係数は $c_{a1} \neq \tilde{c}_{a1}$ であれば、リンク1を目標姿勢に制御することが可能であるが、【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】では、図4.4の関係に沿うように粘性摩擦係数を $\tilde{c}_{a1} < c_{a1}$ としている。

また、定常状態におけるリンク1の回転角度とリアクションホイールの保有する角運動量は、式(4.9)の関係を常に満たしている。そのため、リンク1を目標姿勢で静止させ、かつすべてのリアクションホイールを角速度0で静止させるには、リンク1の回転軸に働く粘性摩擦係数を変化させるしかない。よって、関節における接触部の状態を機械的に変化させる機構やER流体を用いた装置などをベースとリンク1の間に取り付けて、粘性摩擦係数を変化させる必要がある。しかし、リンク2の回転軸は完全な非駆動関節として、システムを目標状態に制御することが可能である。

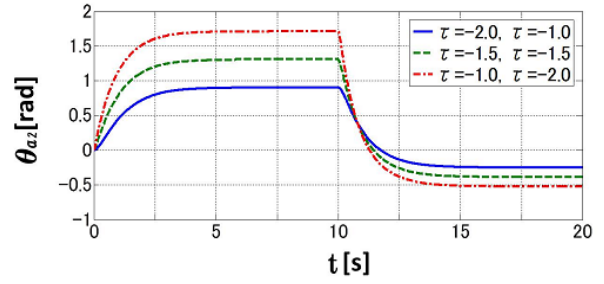
4.3.2 RW の角運動量を利用したリンク2の姿勢制御

式(4.7)の関係より、それぞれのリアクションホイールが一定の角速度で回転している定常状態でそれぞれの駆動モータの制御トルクを0にしたとき、リンク1が静止する姿勢は、リアクションホイールRW1とリアクションホイールRW2が持つ角運動量の和 K_s の大きさで決まる。そのため、リアクションホイールRW1とリアクションホイールRW2それぞれが持つ角運動量の大きさの比率が異なっても、それぞれが持つ角運動量の和 K_s の大きさが同じであれば、リンク1は必ず同じ姿勢で静止することになる。しかし、リアクションホイールRW1とリアクションホイールRW2が持つ角運動量の和 K_s が同じでも、それぞれが保有している角運動量の大きさの比率が異なるとき、式(4.8)の関係よりリンク2は違う姿勢で静止すると考えられる。よって、それぞれのリアクションホイールが持つ角運動量の和 K_s を変えずに、角運動量の大きさの比を変えることで、それぞれの駆動モータが消費するエネルギーの大きさの和を変えずにリンク2を任意の姿勢に制御することができる可能性がある。そこで、2つのリアクションホイールが持つ角運動量の和は変えずに、それぞれのリアクションホイールが持つ角運動量の比率を変えたとき、リンク2の静止位置が変わるのかを数値シミュレーションにより確かめた。数値シミュレーションは、リンクとリアクションホイールが姿勢を $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ で静止している状態を $t=0[s]$ として次の手順で行った。まずはじめに、それぞれのリアクションホイールにおける駆動モータの制御トルクの和が $\tau_1 + \tau_2 = -3.0$ となるように制御トルクを与えて定常状態になるまで待つ。そして、10[s]の時点でそれぞれの駆動モータの制御トルクを0にしてすべてのリンクとリアクションホイールの回転が止まるまで待った。その数値シミュレーションの結果を図4.5に示す。

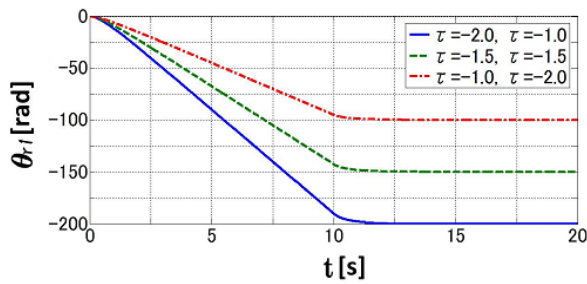
図4.5の結果より、2つのリアクションホイールの持つ角運動量の総和が同じでも、それぞれのリアクションホイールが持つ角運動量の比率が異なると、リンク2は異なる姿勢で静止することがわかる。また、リアクションホイールRW2の持つ角運動量の比率が大きいとき、リンク2が静止する姿勢は初期姿勢から離れることになる。よって、リンク2が最終的に目標位置で静止するようリアクションホイールの角運動量の比率を探ることで、リンク2を任意の位置に制御できる可能性がある。



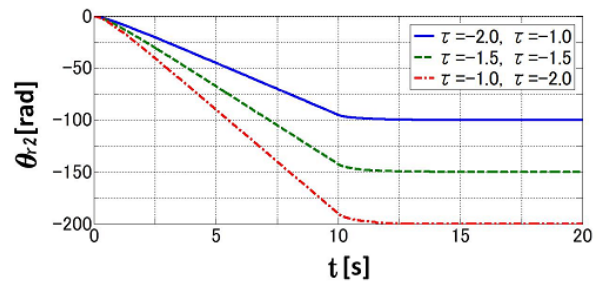
(i) Angle of the link 1



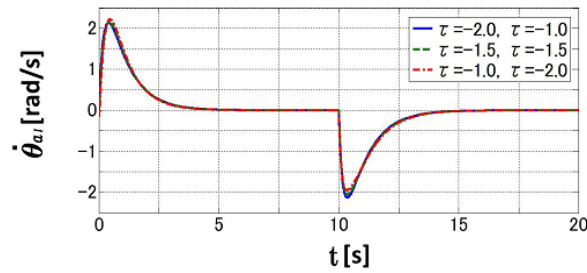
(ii) Angle of the link 2



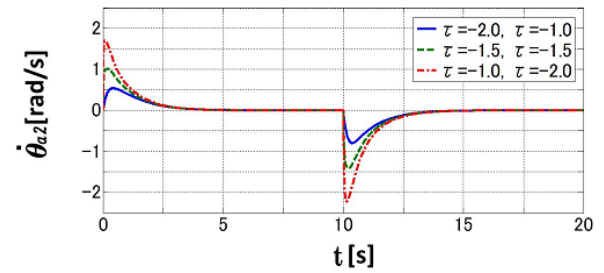
(iii) Angle of the RW1



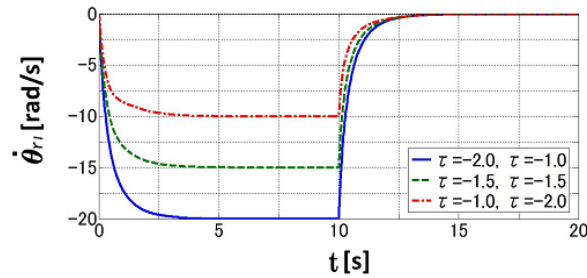
(iv) Angle of the RW2



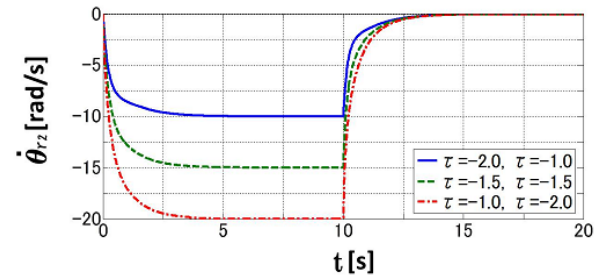
(v) Angular velocity of the link 1



(vi) Angular velocity of the link 2



(vii) Angular velocity of the RW1



(viii) Angular velocity of the RW2

Fig. 4.5: Simulation result with different torque

4.3.3 リンク2を目標姿勢へ収束させる条件

4.2節で述べたように、式(4.8)の関係から、定常状態におけるリンク2の姿勢はリアクションホイールRW2が保有する角運動量とリンク1とリンク2の運動の過程によって決まる。しかし、リンク1とリンク2を同時に動かしながらリンク2を目標姿勢に制御することは難しい。4.3.2項で示したように、リアクションホイールの角運動量をうまく利用すればリンク2を目標姿勢に制御することは可能である考えられるが、リンク2が静止する姿勢を知るためには、駆動モータの制御トルクの大きさを調節しながら実験を繰り返し行うことでしか求めることができない。そこで、【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】を適用した後に、リアクションホイールRW1における駆動モータの制御トルクによってリンク1を目標姿勢 θ_{a1d} から動かないようにする。そして、リアクションホイールRW2の角運動量を利用してリンク2を目標姿勢に制御する方法を考える。

ここで、定常状態でのリンク1の姿勢は、式(4.7)の関係よりそれぞれのリアクションホイールが保有する角運動量の和 K_s によって決まる。そのため、それぞれのリアクションホイールの保有する角運動量の和 K_s が常に0になるような制御トルクをリアクションホイールRW1における駆動モータに与え続ければ、リンク1を目標姿勢 θ_{a1d} に留めておくことができる。

リンク2の目標姿勢として任意の値 θ_{a2d} が与えられているとき、リンク1が目標姿勢 θ_{a1d} で静止している定常状態で、リンク2の姿勢 θ_{a2s} とリアクションホイールRW2の角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ が式(4.11)の関係を満たしていれば、リンク1を静止させたままリアクションホイールRW2における駆動モータの制御トルクを0にすることにより、リンク2を目標姿勢 θ_{a2d} で静止させることができる。

$$\dot{\theta}_{r2s} = -\frac{c_{a2}}{J_{r2}}(\theta_{a2s} - \theta_{a2d}) \quad (4.11)$$

ここで式(4.11)は、式(4.2)からリンク1の運動の項を除き、リンク2が姿勢 θ_{a2s} で静止してリアクションホイールRW2が角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ で回転している時刻 t_s から、リンク2が姿勢 θ_{a2d} で静止してリアクションホイールRW2の角速度が0となる時刻 t_d まで時間積分することで得られる。また、時刻 t_s から時刻 t_d に至る間、リアクションホイールRW1における駆動モータにはそれぞれのリアクションホイールの保有する角運動量の和 K_s が常に0になるような制御トルクを与えている。そのため、時刻 t_d で

リアクションホイール RW2 の角速度が 0 となる時、リアクションホイール RW1 の角速度も 0 にすることができる。

よって、リンク 1 が静止しているとき、何らかの方法でリンク 2 の姿勢 θ_{a2s} とリアクションホイール RW2 の角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ を式 (4.11) の関係を満たす値にすることができる。それぞれリアクションホイールの角速度を 0 へ収束させて、かつリンク 2 を目標姿勢 θ_{a2d} へ制御することができる。

4.3.4 周期入力を用いたリンク 2 の姿勢変化

前述のとおり、任意の初期姿勢から【リンク 1 を目標姿勢に制御するアルゴリズム】を適用した後では、定常状態でのリアクションホイール RW2 の角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ とリンク 2 の姿勢 θ_{a2s} は式 (4.8) の関係によって決まる。そのため、リンク 2 の目標姿勢 θ_{a2d} に対してこれらの値を同時に式 (4.11) の関係を満たすようにすることは難しい。しかし、すべてのリンクとリアクションホイールが角速度 0 で静止している状態から、リンク 1 の姿勢を変えることなく、リンク 2 を姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ に収束させて、かつリアクションホイール RW2 を式 (4.11) の関係を満たす角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ で回転させることができる。以下にその手法を提案する。

これまでに、第 1 関節が駆動、第 2 関節が非駆動な平面 2 リンクマニピュレータにおいて、駆動関節に周期入力を用いることで、第 2 リンクを任意の初期姿勢からある平衡点へ収束できることが分かっている [13][40]。そこでこの結果を応用して、リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクに周期入力を適用することで、リンク 1 を目標姿勢 θ_{a1d} で留めたまま、リンク 2 を姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ に収束させて、かつリアクションホイール RW2 を式 (4.11) の関係を満たす角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ で回転させる方法を考える。

まず、【リンク 1 を目標姿勢に制御するアルゴリズム】を適用して、リンク 1 が目標姿勢 θ_{a1d} で静止している状態にする。そして、駆動モータに制御トルクをそれぞれ発生させて、リアクションホイール RW2 を角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ で、リアクションホイール RW1 を角速度 $\dot{\theta}_{r1s} = -(J_{r2}/J_{r1})\dot{\theta}_{r2s}$ で回転させて定常状態になるまで待つ。ここで、 $\dot{\theta}_{r2s}$ は式 (11) においてリンク 2 の目標姿勢 θ_{a2d} に対して $\theta_{a2s} = 0$ としたときの値とする。この定常状態において、それぞれのリアクションホイールが保有する角運動量の和 K_s は 0 となるため、リンク 1 は目標姿勢 θ_{a1d} で静止する。また、このときリンク 2 は式 (4.8) 左辺の積分項の値から決まる適当な姿勢で静止する。

次に、この定常状態から、リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御

トルクに周期入力を加えてリンク1に目標姿勢 θ_{a1d} を中心とした周期運動を行わせる。しばらくすると、リンク1の運動により発生する遠心力の影響を受けて、リンク2は姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ を中心とした周期運動を行う。そして、制御トルクに加えた周期入力の振幅を減衰させて、リンク1を目標姿勢 θ_{a1d} で、リンク2を姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ で静止させる。

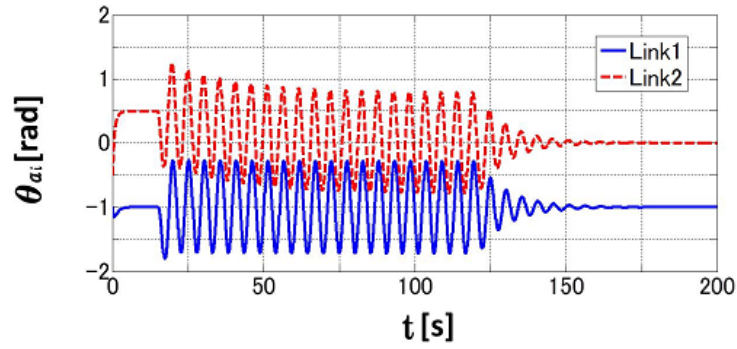
以上の手法の実施可能性を確認するために、表4.1のパラメータの値を用いて数値シミュレーションを行う。まず、【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】を適用後に、リンク1が目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] で、リンク2が姿勢 $\theta_{a20} = -0.5$ [rad] で静止し、それぞれのリアクションホイールの角速度が0となっている状態から始める。そして、リンク1が目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] で、リンク2が姿勢 $\theta_{a20} = 0$ [rad] で静止し、リアクションホイールRW2が角速度 $\dot{\theta}_{r2s} = -10$ [rad/s] で回転する状態にすることができるか確認する。ただし、 $\dot{\theta}_{r2s} = -10$ [rad/s] は、式(4.11)においてリンク2の目標姿勢を $\theta_{a2d} = -1$ [rad] とした場合を仮定している。また、定常状態になっている時刻 t_s [s] 以後にリンク1とリンク2に周期運動を行わせるため、リアクションホイールRW2における駆動モータの制御トルクとして、式(4.12)の値を一例として用いる。

$$\tau_2 = \sin(t - t_s) + c_{r2}\dot{\theta}_{r2s} \quad (4.12)$$

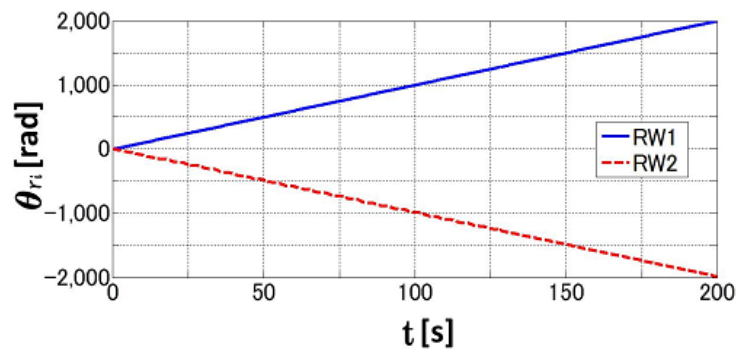
さらに、時刻 t_c [s] 以後はリアクションホイールRW2における駆動モータの制御トルクを式(4.13)の値にして制御トルクに加えた周期入力の振幅を減衰させる。

$$\tau_2 = e^{-(t-t_c)} \sin(t - t_s) + c_{r2}\dot{\theta}_{r2s} \quad (4.13)$$

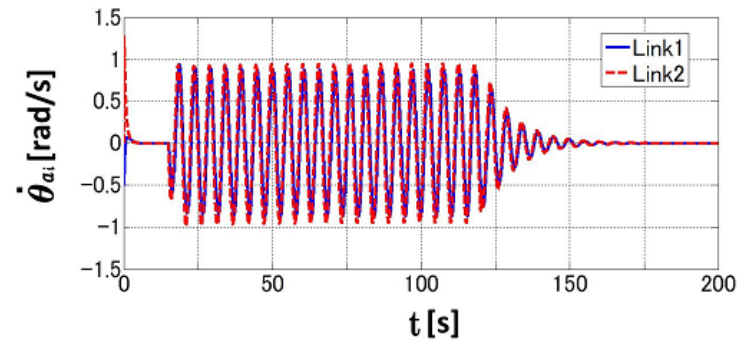
以上の条件で行った数値シミュレーションの結果を図4.6に示す。以下に各時刻におけるシステムの挙動の結果を述べる。



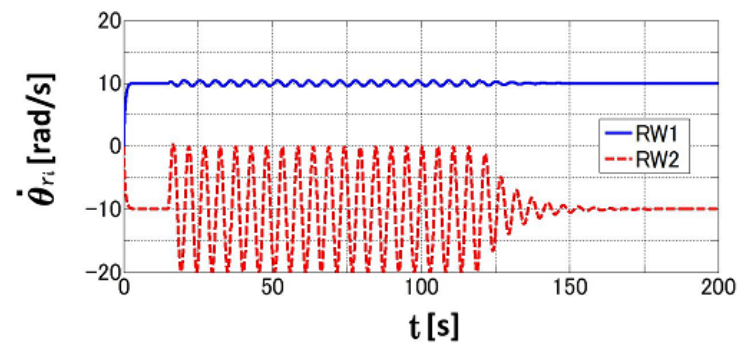
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 4.6: Simulation result with a cycle input

・時刻 ($0 \leq t < 15$) におけるシステムの挙動

リアクションホイール RW2 の駆動モータに制御トルク $\tau_2 = c_{r2}\dot{\theta}_{r2s}$ を加え、リアクションホイール RW1 の駆動モータに制御トルク $\tau_1 = c_{r1}\dot{\theta}_{r1s}$ を加えると、リンク 1 はリンク 2 の回転反力によって微動するが、すぐにリンク 1 の姿勢は式 (4.7) の関係どおり目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] に戻る。このとき、リアクションホイール RW2 の角速度は $\dot{\theta}_{r2s} = -10$ [rad/s] に、リアクションホイール RW1 の角速度は $\dot{\theta}_{r1s} = 10$ [rad/s] になり、リンク 2 は姿勢 $\theta_{a2s} = 0.5$ [rad] で静止する。

・時刻 ($15 \leq t < 120$) におけるシステムの挙動

リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクを式 (4.12) の値にすると、リンク 1 は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] を中心とした周期運動を開始し、リンク 2 は時間と共に振動中心を変化させながら振動する。そして、時刻 $t = 90$ [s] 頃からリンク 2 は姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ [rad] を中心とした周期運動を行う。このとき、式 (4.12) で与えられる制御トルクによってリアクションホイール RW2 は加減速を繰り返しながら回転している。

・時刻 ($120 \leq t < 200$) におけるシステムの挙動

リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクを式 (4.13) の値にすると、リアクションホイール RW2 の角速度の振幅は減衰していき、同時にリンク 1 とリンク 2 の周期運動の振幅も減衰していく。そして、十分に時間が経過すると、リンク 1 は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] に、リンク 2 は姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ [rad] に収束していく。このとき、リアクションホイール RW2 の角速度は $\dot{\theta}_{r2s} = -10$ [rad/s] に、リアクションホイール RW1 の角速度は $\dot{\theta}_{r1s} = 10$ [rad/s] に収束していく。

以上の結果から、本節で提案した手法の実施可能性を確認することができた。

4.4 2リンク TUM の姿勢制御法の提案

4.4.1 2リンク TUM の制御アルゴリズム

これまでに述べた結果から、次の制御アルゴリズムを適用することで、すべてのリンクとリアクションホイールが角速度0で静止している初期状態から、それぞれのリンクが任意の目標姿勢で静止し、そのときリアクションホイールの角速度がそれぞれ0となる目標状態に制御することができる。

【2リンク TUM の制御アルゴリズム】

- <Step0> 【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】を適用して、リンク1を目標姿勢 θ_{a1d} に制御する。
- <Step1> 式(4.11)の関係から、リンク2の目標姿勢 θ_{a2d} に対するリアクションホイール RW2の角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ の値を求める。ここで、式(4.11)における θ_{a2s} の値は0とする。
- <Step2> それぞれの駆動モータに制御トルクを発生させて、リアクションホイール RW2 を角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ で、リアクションホイール RW1 を角速度 $\dot{\theta}_{r1s} = -(J_{r2}/J_{r1})\dot{\theta}_{r2s}$ で回転させて定常状態になるまで待つ。
- <Step3> 定常状態になっている時刻 t_s で、リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクを式(4.12)の値にして、リンク2が姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ を中心として周期運動するまで待つ。
- <Step4> 時間が経過し、リンク1が目標姿勢 θ_{a1d} を、リンク2が姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ を中心として周期運動している時刻 t_c で、リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクを式(13)の値にして、リンク1とリンク2の周期運動の振幅が十分小さくなるまで待つ。
- <Step5> 時間が経過し、リンク1が目標姿勢 θ_{a1d} 、リンク2が姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ の近傍に留まっているとき、リアクションホイール RW1 における駆動モータの制御トルクに状態フィードバック制御則 $\tau_1 = K_{pa}(\theta_{a1} - \theta_{a1s}) + K_{da}\dot{\theta}_{a1}$ (K_{pa}, K_{da} : 定数) を適用しながらリアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクを0にする。

4.4.2 提案手法の実施可能性の確認

提案する【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の実施可能性を確認するため、リンクとリアクションホイールの初期姿勢を $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 、目標姿勢を $\mathbf{x}_d = [-1 \ -1 \ \theta_{r1d} \ \theta_{r2d}]^T$ (θ_{r1d} , θ_{r2d} は未定の定数) として数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションで使用するリンク1の回転軸に働く粘性摩擦係数は $c_{a1} = 0.5$ [kg m²/s] と $\tilde{c}_{a1} = 0.1$ [kg m²/s] とした。その他のパラメータは表4.1の値を使用した。ここで、【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】の<Step0>において、目標とする式(4.9)と式(4.10)の交点は $P(\theta_{a1s}, K_s) = (0.25, -0.125)$ である。ここでは、簡単のためにそれぞれのリアクションホイールの駆動モータに同じ大きさの制御トルクを加えて $K_s = -0.125$ の角運動量を持たせることにする。よって、【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】の<Step2>では、それぞれのリアクションホイールの駆動モータに制御トルク $\tau_i = c_{ri}\dot{\theta}_{ris} = -0.125$ [Nm] ($i = 1, 2$) を加える。また、【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の<Step1>において、リンク2の目標姿勢 $\theta_{a2d} = -1$ [rad] に対してリアクションホイール RW2 が式(4.11)の関係を満たすときの角速度は $\dot{\theta}_{r2s} = -10$ [rad/s] となる。よって、【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の<Step2>では、リアクションホイール RW2 の駆動モータに制御トルク $\tau_2 = c_{r2}\dot{\theta}_{r2s} = -1$ [Nm] を加え、リアクションホイール RW1 の駆動モータに制御トルク $\tau_1 = c_{r1}\dot{\theta}_{r1s} = 1$ [Nm] を加える。さらに、【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の<Step5>において、フィードバックゲインの値は $(K_{pa}, K_{da}) = (100, 100)$ とする。以上の条件で行った数値シミュレーションの結果を図4.7に示す。以下に各時刻におけるシステムの挙動の結果を述べる。

・時刻 ($0 \leq t < 15$) におけるシステムの挙動

リンク1の回転軸に働く粘性摩擦係数を $c_{a1} = 0.5$ [kg m²/s] にして、それぞれのリアクションホイールの駆動モータに制御トルク $\tau_i = -0.125$ [Nm] ($i = 1, 2$) を加えてから、それぞれのリアクションホイールが角速度 $\dot{\theta}_{ris} = -1.25$ [rad/s] ($i = 1, 2$) で回転する定常状態になるとき、リンク1は回転角度 $\theta_{a1s} = 0.25$ [rad] で、リンク2は回転角度 $\theta_{a2s} = 0.125$ [rad] で静止する。

・時刻 ($15 \leq t < 50$) におけるシステムの挙動

リンク1の回転軸に働く粘性摩擦係数を $\tilde{c}_{a1} = 0.1$ [kg m²/s] に変更して、リアクションホイールにおける駆動モータの制御トルクをそれぞれ0にすると、リンクはそれぞれ初期姿勢に戻る方向に動き出す。その後、それぞれのリアクションホイールが

角速度0の定常状態になるとき、リンク1は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] で、リンク2は姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ [rad] で静止する。

・時刻 ($50 \leq t < 80$) におけるシステムの挙動

リアクションホイール RW2 の駆動モータに制御トルク $\tau_2 = -1$ [Nm] を、リアクションホイール RW1 の駆動モータに制御トルク $\tau_1 = 1$ [Nm] を加えてから、リアクションホイール RW2 が角速度 $\dot{\theta}_{r2s} = -10$ [rad/s] で、リアクションホイール RW1 が角速度 $\dot{\theta}_{r1s} = 10$ [rad/s] で回転する定常状態になるとき、リンク1は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] で、リンク2は姿勢 $\theta_{a2s} = 1$ [rad] で静止する。

・時刻 ($80 \leq t < 200$) におけるシステムの挙動

リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクを式 (4.12) の値にすると、リンク1は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] を中心とした周期運動を、リンク2は姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ [rad] を中心とした周期運動を行う。

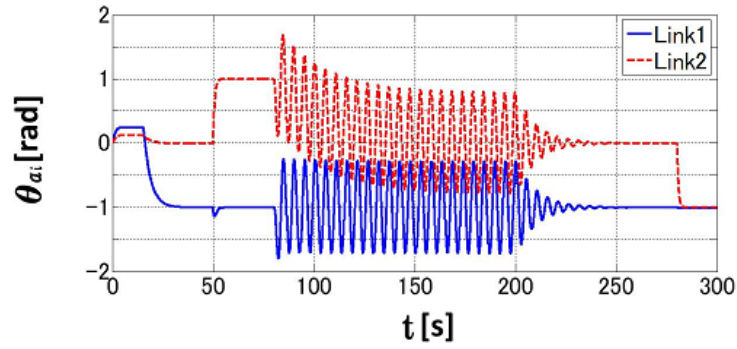
・時刻 ($200 \leq t < 280$) におけるシステムの挙動

リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクを式 (4.13) の値にすると、それぞれのリンクが行っている周期運動の振幅は時間と共に減衰していき、リンク1は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] に、リンク2は姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ [rad] に収束していく。

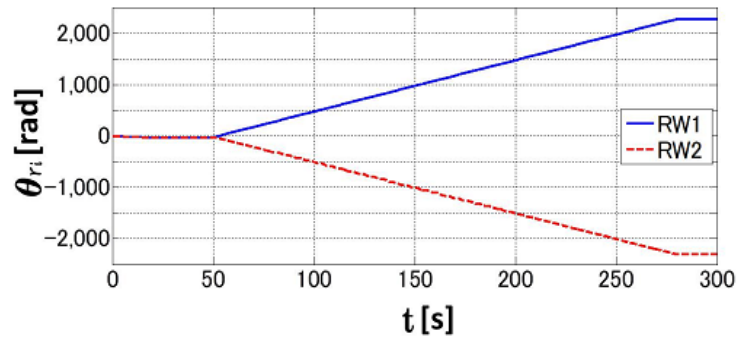
・時刻 ($280 \leq t < 300$) におけるシステムの挙動

リアクションホイール RW1 における駆動モータの制御トルクに状態フィードバック制御則 $\tau_1 = K_{pa}(\theta_{a1} - \theta_{a1s}) + K_{da}\dot{\theta}_{a1}$ を適用しながらリアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクを0にすると、リンク1はリンク2の回転反力によって微動するが、すぐに状態フィードバック制御の効果で目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] に収束して留まり続ける。その後、それぞれのリアクションホイールの角速度は0となり、リンク2は目標姿勢 $\theta_{a2d} = -1$ [rad] で静止する。

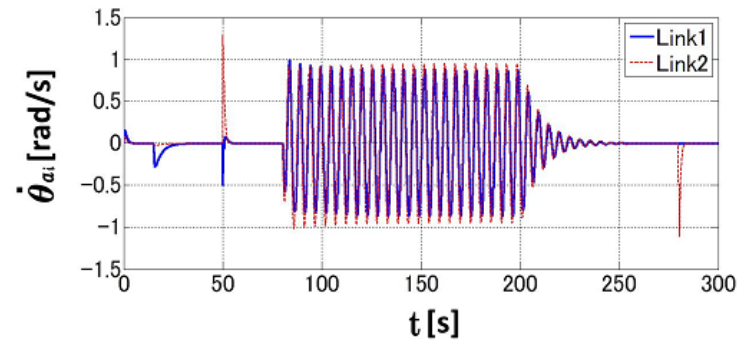
以上の結果から、本章で提案した手法である【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の実施可能性を確認することができた。



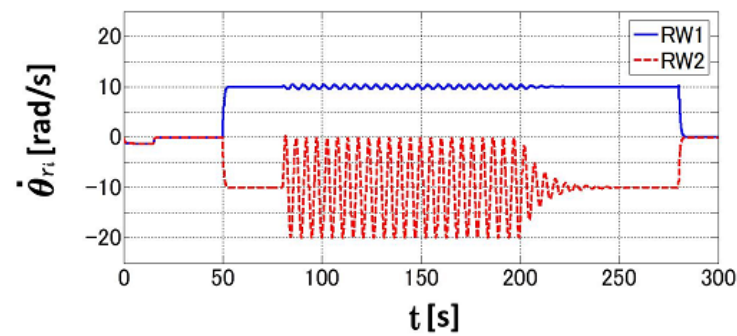
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

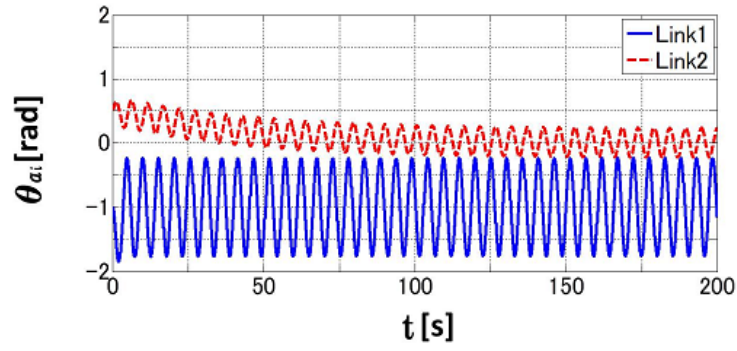
Fig. 4.7: Simulation result with the proposed control method of 2-link TUM

4.5 提案手法の制御特性の考察

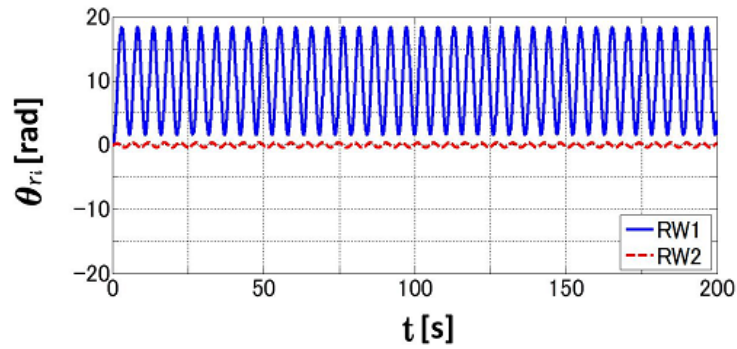
4.5.1 RW の周期運動とリンクの周期運動の関係

さて、前節で提案した制御手法では、リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクに周期入力を加えることで、それぞれのリンクに周期運動を行わせている。ここで、それぞれのリンクを周期的に動かすことは、リアクションホイール RW1 における駆動モータの制御トルクに周期入力を加えることでも可能である。しかし、加える周期入力の大きさが同じであるなら、リアクションホイール RW1 よりもリアクションホイール RW2 を利用した方が、リンク 2 の姿勢が $\theta_{a2s}=0$ [rad] に収束するまでの時間は短くなる。これは、式 (4.8) の関係から、リンク 2 の姿勢は各リンクの運動の過程とリアクションホイール RW2 の角速度によって決まることから予想がつく。

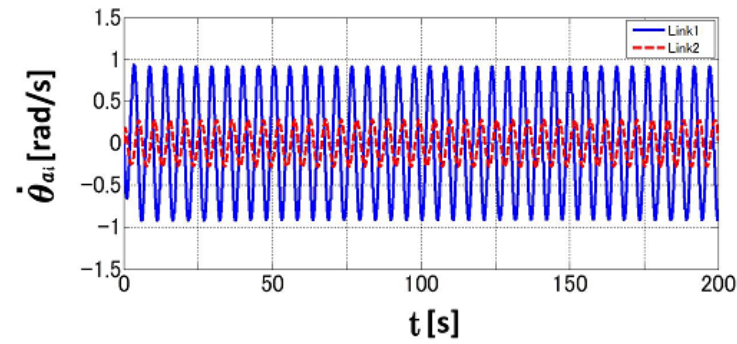
一例として、リアクションホイール RW1 の駆動モータの制御トルク τ_1 に周期入力を加えた場合とリアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルク τ_2 に周期入力を加えた場合において、リンク 2 が姿勢 $\theta_{a2s}=0$ [rad] に収束するまでの時間を比較してみた。ここで、リンクとリアクションホイールの初期姿勢を $\mathbf{x}_0 = [-1 \ 0.5 \ 0 \ 0]^T$ 、リアクションホイール RW1 の初期角速度を $\dot{\theta}_{r1}=0$ [rad]、リアクションホイール RW2 の初期角速度を $\dot{\theta}_{r2}=0$ [rad] とし、数値シミュレーションを行った。リアクションホイールに加える周期入力の大きさは $\sin(t)$ とした。リアクションホイール RW1 の駆動モータの制御トルク τ_1 に周期入力を加えたときの数値シミュレーションの結果を図 4.8 に、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルク τ_2 に周期入力を加えたときの数値シミュレーションの結果を図 4.9 に示す。図 4.8-(i) と図 4.9-(i) を比較すると、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルク τ_2 に周期入力を加えたときの方が、リアクションホイール RW1 の駆動モータの制御トルク τ_1 に周期入力を加えたときと比べてリンク 2 の姿勢が $\theta_{a2s} = 0$ [rad] に収束するまでの時間が短いことが分かる。このことから、本論文では、リンクに周期運動を行わせるとき、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルク τ_2 に周期入力を加えることにしている。



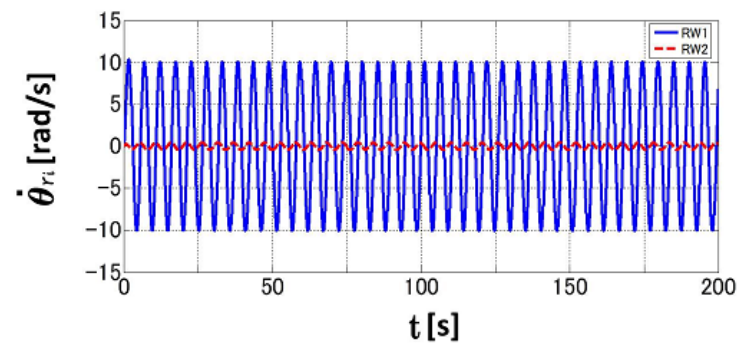
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

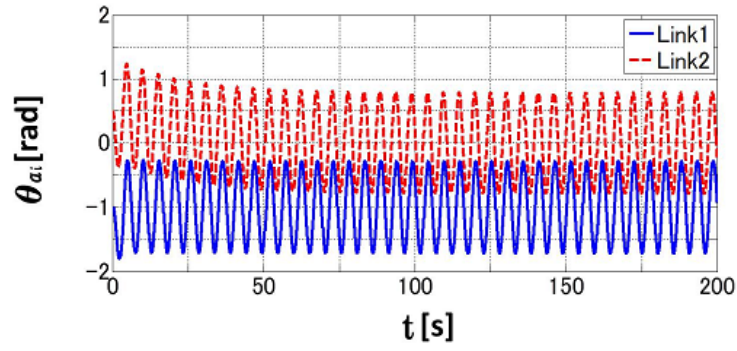


(iii) Angular Velocity of the link

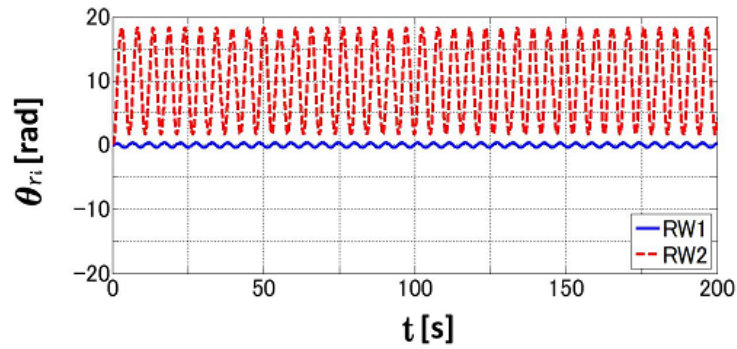


(vi) Angular Velocity of the RW

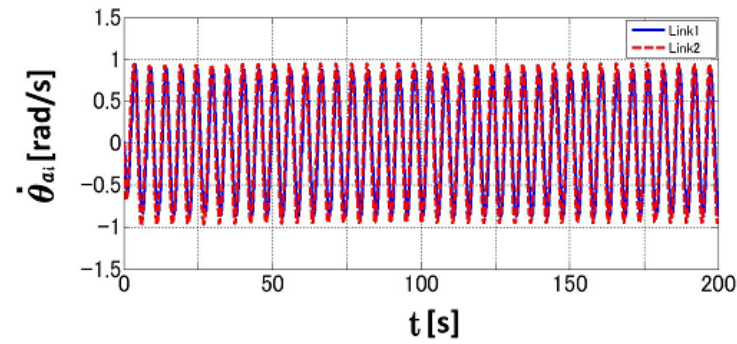
Fig. 4.8: Simulation result with torque of RW1



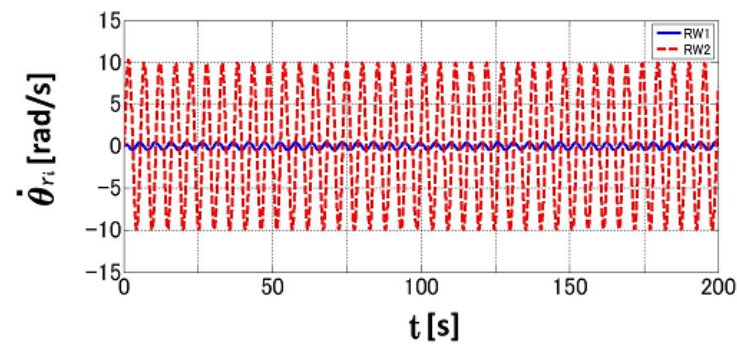
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 4.9: Simulation result with torque of RW2

4.5.2 リンク1の揺動がリンク2の姿勢制御に与える影響

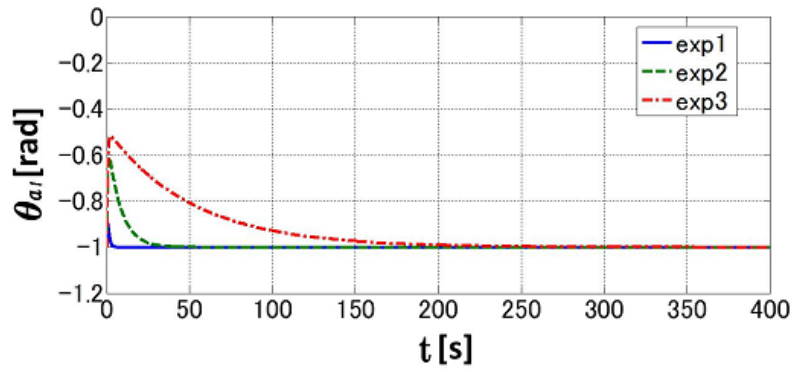
前述した【リンク2を目標姿勢に制御するアルゴリズム】の<Step5>において、リアクションホイールRW1における駆動モータの制御トルクにリンク1の姿勢を保持する状態フィードバック制御を適用している。しかし、このような状態フィードバック制御則を適用しながら、リアクションホイールRW2における駆動モータの制御トルクを0にすると、リンク2の回転軸周りの粘性摩擦の影響により生じる力がリンク1に伝わり、リンク1が揺動する問題が起こる。リンク1の揺動を抑えるためには、すべてのリンクとリアクションホイールの状態をフィードバックすることで、効果的な制御を行うことができるが、センサの数が増えてしまう。本研究では、できるだけ少ないセンサで姿勢制御を行うために、リンク1の姿勢と角速度の状態のみをフィードバックしてリンク1の揺動を抑えることを考えている。そのため、リンク1の揺動がリンク2の姿勢制御に与える影響について考察することは重要となる。

そこで、一例として、【2リンクTUMの制御アルゴリズム】の<Step4>が終了して、リンク1が姿勢 $\theta_{a1s}=-1[\text{rad}]$ で、リンク2が $\theta_{a2s}=0[\text{rad}]$ の姿勢で静止している状態から、リンク2を目標姿勢 $\theta_{a2d}=-1[\text{rad}]$ に制御することを試みた。ここで、リンク2を目標姿勢 $\theta_{a2d}=-1[\text{rad}]$ に制御するために必要なリアクションホイールRW2の角速度 $\dot{\theta}_{r2s}$ は、式(10)の関係より $\dot{\theta}_{r2s}=-10[\text{rad/s}]$ である。また、【2リンクTUMの制御アルゴリズム】の<Step5>で生じるリンク1の揺動の影響を知るために、リンク2の質量 m_{a2} とリンク2の長さ l_{a2} 、リンク2の慣性モーメント J_{a2} の値にそれぞれ表4.2のパラメータを用いた。その他のパラメータは表4.1の値を使用した。さらに、【2リンクTUMの制御アルゴリズム】の<Step5>において使用するフィードバックゲインの値は $(K_{pa}, K_{dr}) = (0.01, 0.01)$ とした。以上の条件で行った数値シミュレーションの結果を図4.10に示す。

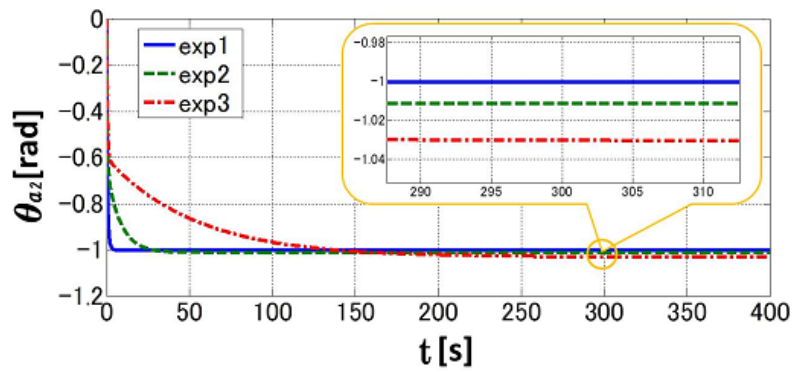
図4.10の結果より、リンク1の揺動が大きくなると、最終的にリンク2が静止する姿勢と目標姿勢の間の定常誤差も大きくなることが分かる。しかし、定常誤差の大きさは、リンク1の揺動の大きさに関わらず微小なものであることが分かる。よって、提案手法においてリンク1の揺動がリンク2の姿勢制御に与える影響は小さいといえる。また、数値シミュレーションに用いるフィードバックゲインの値を調節することで、リンク2の静止姿勢と目標姿勢の間に生じる定常誤差は十分に小さくすることができる。以上のことから、【2リンクTUMの制御アルゴリズム】の<Step5>で適用する状態フィードバック制御則には、リンク1の姿勢と角速度の状態のみをフィードバックするだけで十分な効果があるといえる。

Table 4.2: Physical parameters of the link2

experimental number	parameters	value
exp1	$[m_{a2} \ l_{a2} \ J_{a2}]$	$[0.5 \ 0.3 \ 0.01]$
exp2	$[m_{a2} \ l_{a2} \ J_{a2}]$	$[2.5 \ 1.5 \ 0.05]$
exp3	$[m_{a2} \ l_{a2} \ J_{a2}]$	$[5.0 \ 3.0 \ 0.1]$



(i) Angle of the link1



(ii) Angle of the link2

Fig. 4.10: Influence of oscillation of the first link

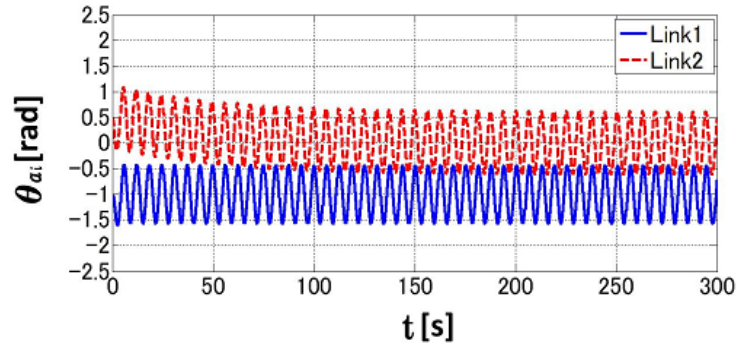
4.5.3 周期入力 of 周期と周波数を変えた場合

【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の <Step3> では、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに周期入力を加えることで、リンク 2 を角度 0 の姿勢に制御している。この方法は、複雑な制御をすることなくリンク 2 を角度 0 の姿勢に制御することができるが、姿勢制御に時間がかかるという問題点がある。そこで、ここでは周期入力によるリンク 2 の姿勢変化の応答性を向上させる方法について述べる。ここで、リンクが周期運動を行うことでリンク 2 の姿勢が変化するのは、遠心力の影響が大きいと考えられる。そこで、遠心力の大きさを変化させたとき、リンク 2 が角度 0 の姿勢に収束するまでの時間がどのように変化するかを数値シミュレーションにより確認する。遠心力の大きさを変化させるためには、リンクの角速度とリンクの質量を変えればよい。ここでは、リンクの角速度を変化させるために、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに加える周期入力の振幅と周期の大きさを変化させることとする。以下では、周期入力の振幅、周波数をそれぞれ変えたときのリンク 2 の姿勢変化について数値シミュレーションの結果から考察していく。ここで数値シミュレーションでは、リンク 1 の初期姿勢を $\theta_{a1} = -1$ [rad]、リンク 2 の初期姿勢を $\theta_{a2} = 0.5$ [rad] とし、それぞれのリアクションホイールの回転は止まっているとする。

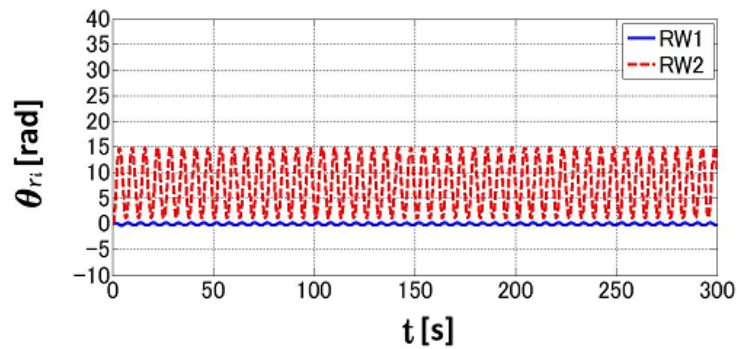
まずはじめに、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに加える周期入力の振幅の大きさがリンク 2 の姿勢変化に及ぼす影響について考察する。ここで、加える周期入力の大きさは、 $A \sin(t)$ ($A=0.8, 1.2, 2.0$) とする。リンク 1 が姿勢 $\theta_{a1} = -1$ [rad] で静止して、リンク 2 が姿勢 $\theta_{a2} = 0.5$ [rad] で静止している時刻を $t=0$ [s] として、 $t=300$ [s] になるまでリアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルク τ_2 に $A \sin(t)$ を与え続ける数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションの結果を図 4.11～図 4.13 に示す。図 4.11 はリアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに加える周期入力の振幅の大きさを $A=0.8$ としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図 4.12 はリアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに加える周期入力の振幅の大きさを $A=1.2$ としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図 4.13 はリアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに加える周期入力の振幅の大きさを $A=2.0$ としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図 4.11-(i) と図 4.12-(i) と図 4.13-(i) の結果からわかるように、駆動モータの制御トルクに加える周期入力の周期

を変えずに振幅の大きさだけを変えた場合、リンク2が角度0の姿勢に収束するまでの時間は振幅が大きいほど短くなることがわかる。このことは、振幅が大きいほどそれぞれのリンクの角速度は大きくなり、リンクに働く遠心力が大きくなるためであると考えられる。

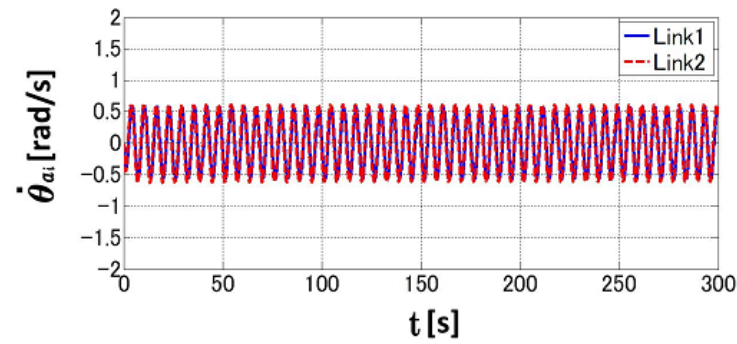
次に、リアクションホイールRW2の駆動モータの制御トルクに加える周期入力
の周波数の大きさがリンク2の姿勢変化に及ぼす影響について考察する。ここで、加える周期入力
の大きさは、 $\sin(Bt)$ ($B=0.8, 1.2, 2.0$) とする。リンク1が姿勢 $\theta_{a1} = -1$ [rad] で静止して、
リンク2が姿勢 $\theta_{a2} = 0.5$ [rad] で静止している時刻を $t=0$ [s] とし
て、 $t=300$ [s] になるまでリアクションホイールRW2の駆動モータの制御トルク τ_2 に
 $\sin(Bt)$ を与え続ける数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションの結果
を図4.14～図4.17に示す。図4.14はリアクションホイールRW2の駆動モータの制御
トルクに加える周期入力
の周波数の大きさを $B=0.8$ としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図4.15はリアクションホイールRW2の駆動モータの制御トルクに加える周期入力
の周波数の大きさを $B=0.8$ としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図4.16はリアクションホイールRW2の駆動モータの制御トルクに加える周期入力
の周波数の大きさを $B=0.8$ としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図4.14-(i)と図4.15-(i)と図4.16-(i)の結果からわかるように、駆動モータの制御トルクに加える周期入力
の振幅を変えずに周波数の大きさだけを変えた場合、リンク2が角度0の姿勢に収束するまでの時間はほとんど変わらないことがわかる。よって、駆動モータの制御トルクに加える周期入力
の周波数の大きさはリンク2の姿勢制御の応答性にあまり関係しないといえる。



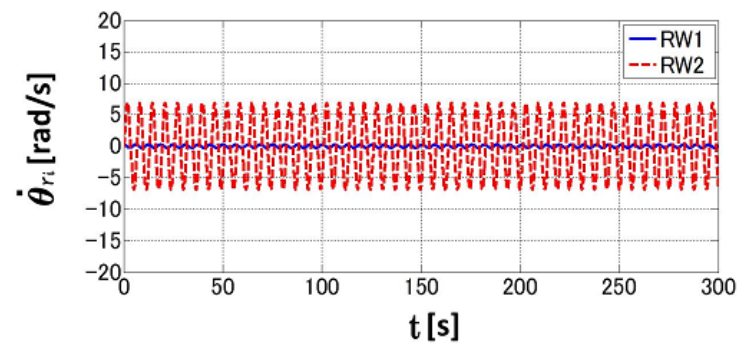
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

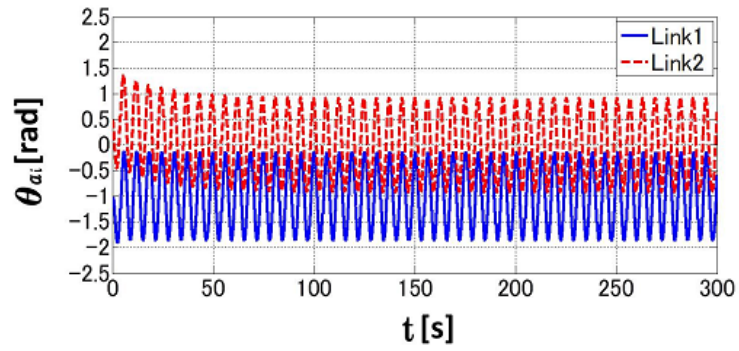


(iii) Angular Velocity of the link

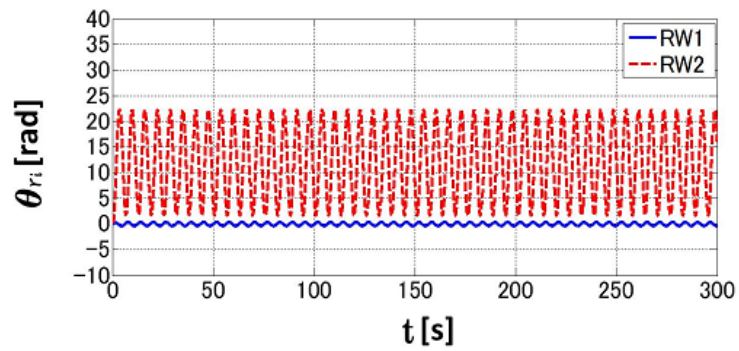


(vi) Angular Velocity of the RW

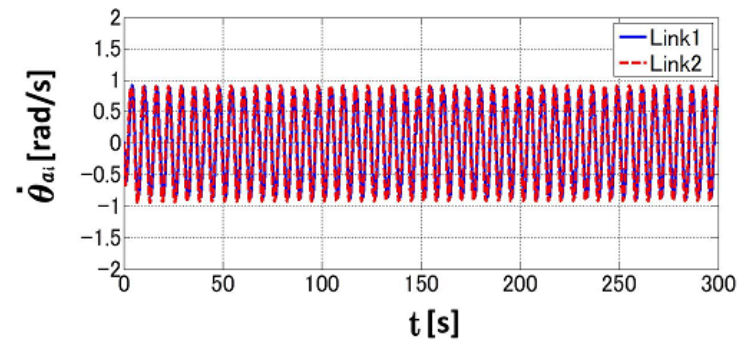
Fig. 4.11: Simulation result with $A=0.8$



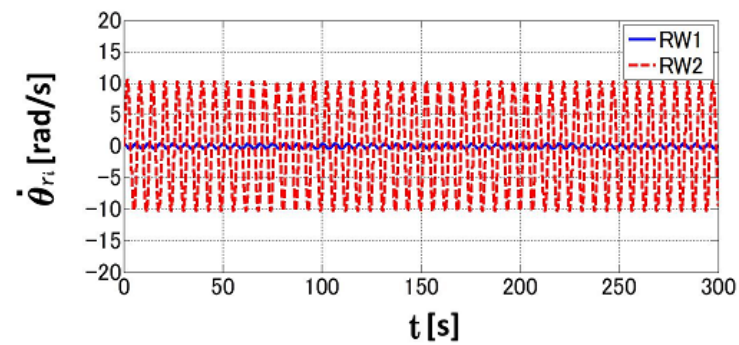
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

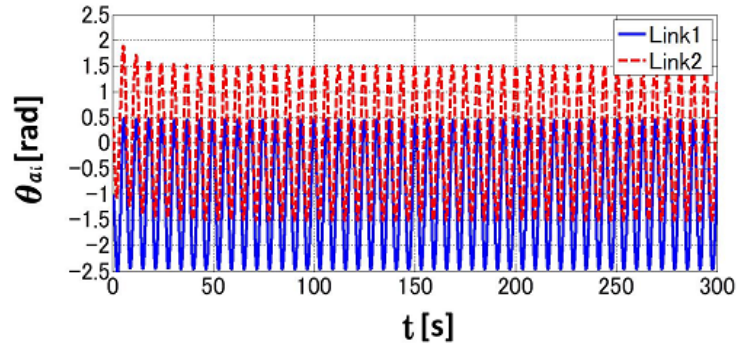


(iii) Angular Velocity of the link

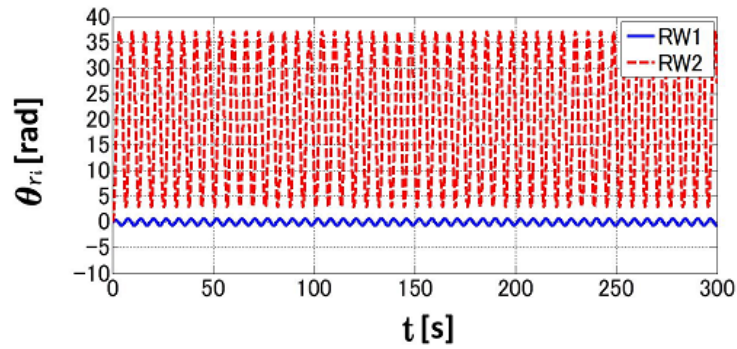


(vi) Angular Velocity of the RW

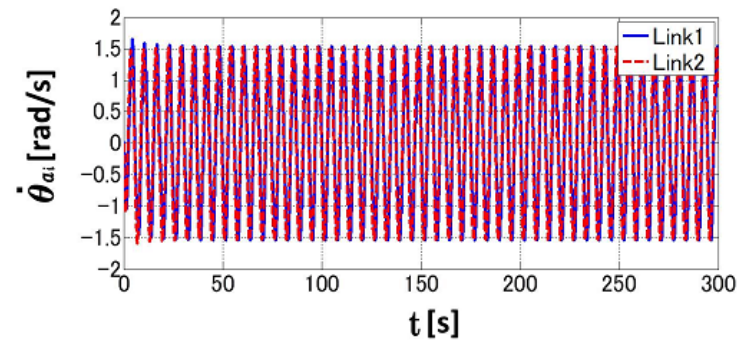
Fig. 4.12: Simulation result with $A=1.2$



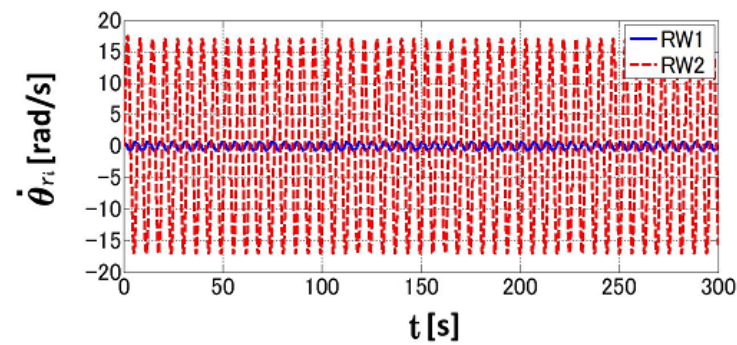
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

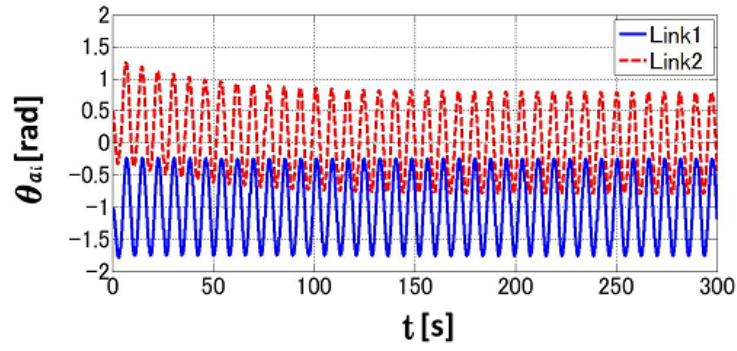


(iii) Angular Velocity of the link

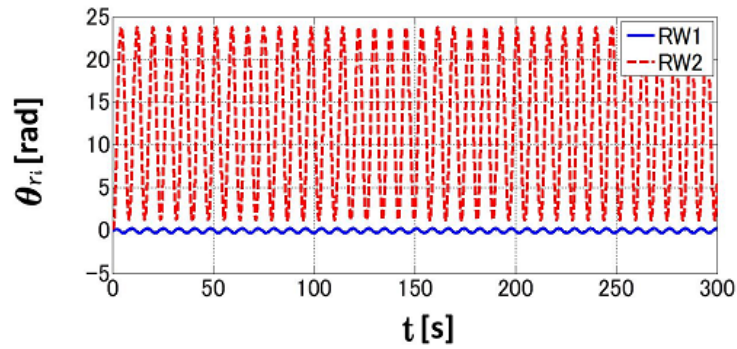


(vi) Angular Velocity of the RW

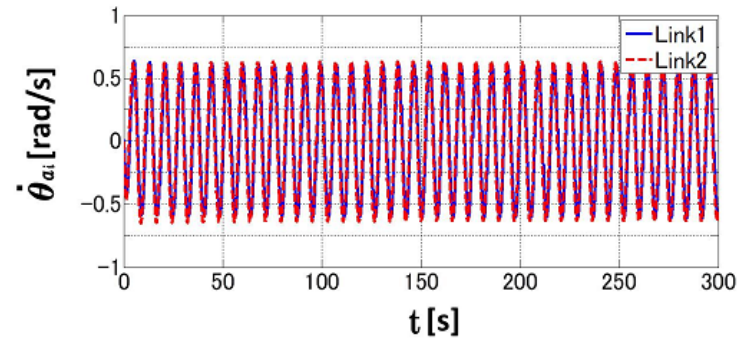
Fig. 4.13: Simulation result with $A=2.0$



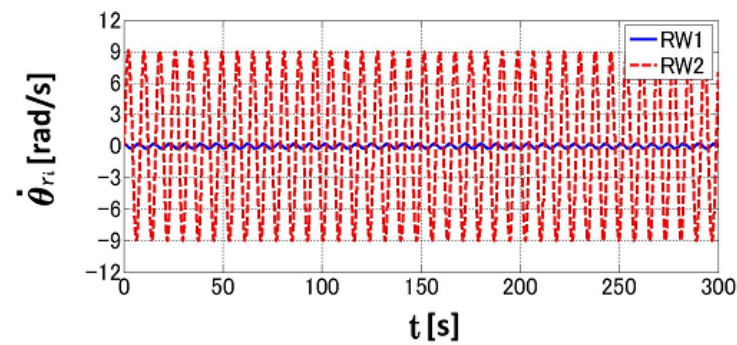
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

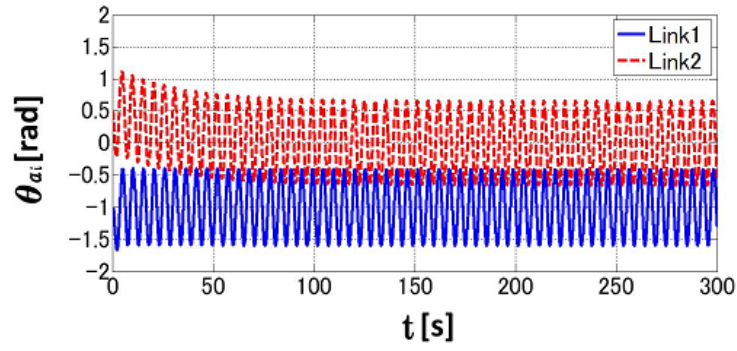


(iii) Angular Velocity of the link

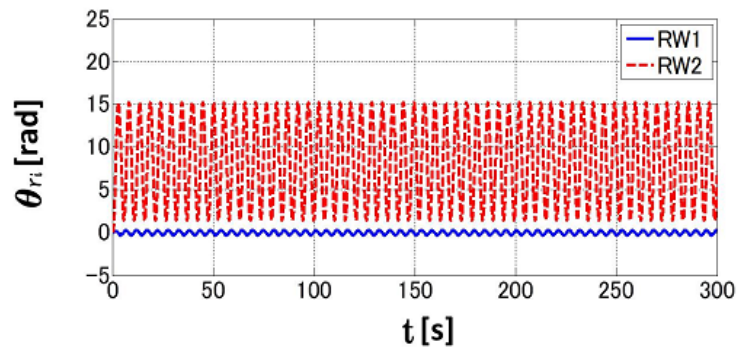


(vi) Angular Velocity of the RW

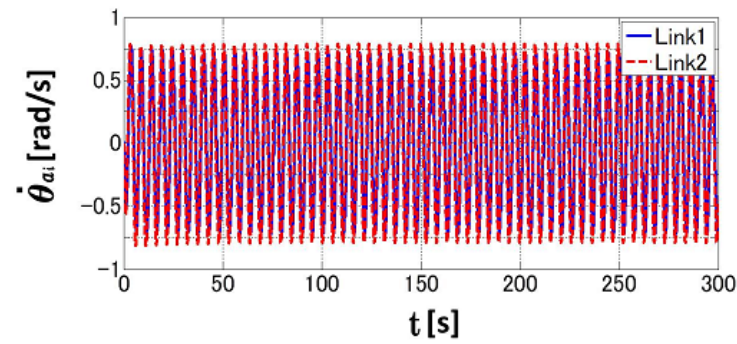
Fig. 4.14: Simulation result with $B=0.8$



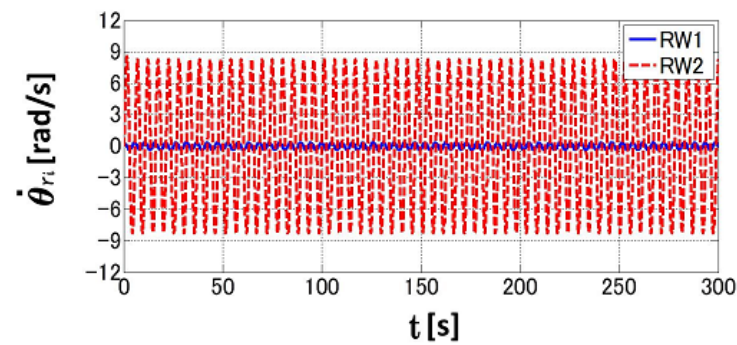
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

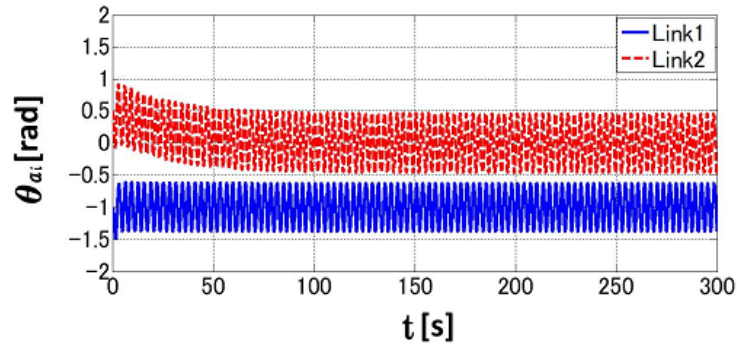


(iii) Angular Velocity of the link

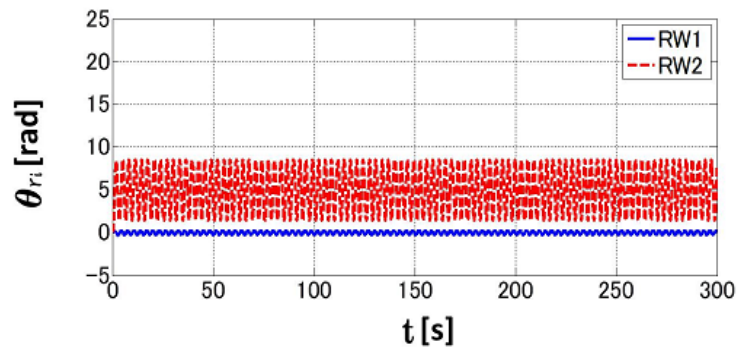


(vi) Angular Velocity of the RW

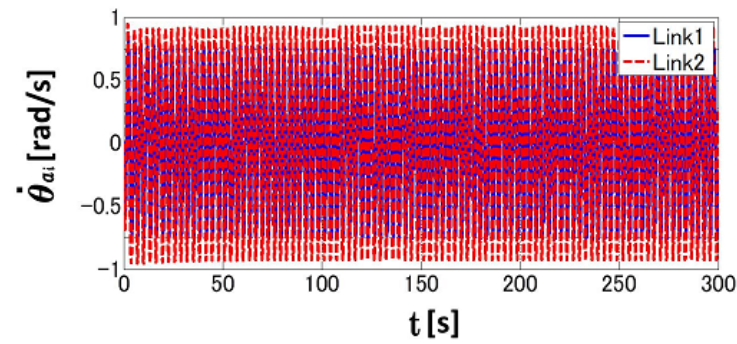
Fig. 4.15: Simulation result with $B=1.2$



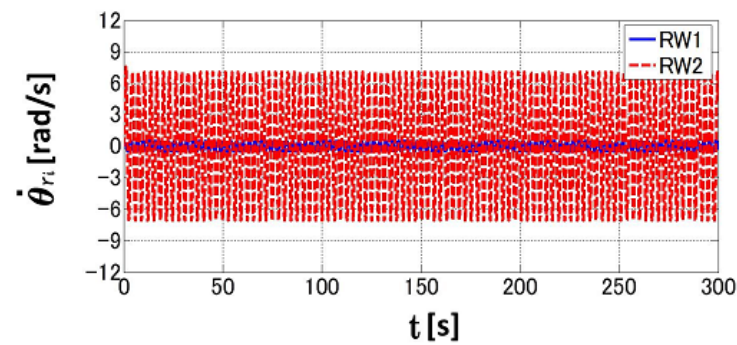
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 4.16: Simulation result with $B=2.0$

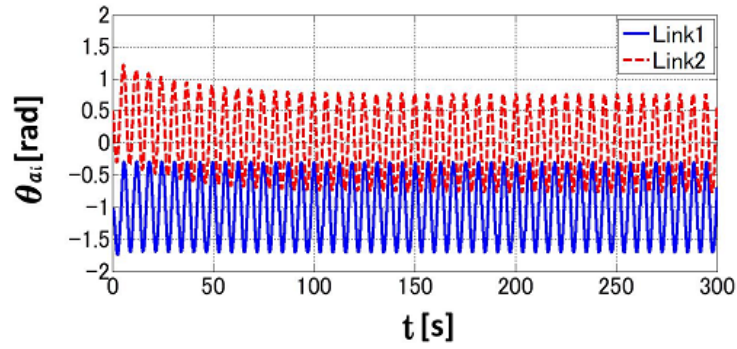
4.5.4 リンクの質量と慣性モーメントを変えた場合

次に、リンクの遠心力の大きさを変化させるために、リンク1の質量と慣性モーメントの大きさ、リンク2の質量と慣性モーメントの大きさをそれぞれ変えて数値シミュレーションを行った。以下では、数値シミュレーションの結果からリンク2の姿勢変化について考察していく。

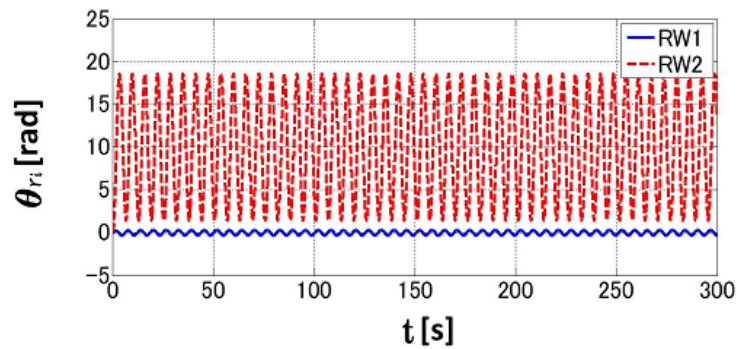
まずはじめに、リンク1の質量と慣性モーメントの大きさがリンク2の姿勢変化に及ぼす影響について考察する。リンク1が姿勢 $\theta_{a1} = -1$ [rad] で静止して、リンク2が姿勢 $\theta_{a2} = 0.5$ [rad] で静止している時刻を $t=0$ [s] として、 $t=300$ [s] になるまでリアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルク τ_2 に $\sin(t)$ を与え続ける数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションの結果を図4.17～図4.19に示す。図4.17はリンク1の質量を $m_{a1}=1.0$ [kg]、リンク1の慣性モーメントを $J_{a1}=0.02$ [kgm²] としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図4.18はリンク1の質量を $m_{a1}=2.5$ [kg]、リンク1の慣性モーメントを $J_{a1}=0.05$ [kgm²] としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図4.19はリンク1の質量を $m_{a1}=5.0$ [kg]、リンク1の慣性モーメントを $J_{a1}=0.1$ [kgm²] としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図4.17-(i) と図4.18-(i) と図4.19-(i) の結果からわかるように、リンク1の質量と慣性モーメントの大きさを変えた場合、リンク2が回転角度0の姿勢に収束するまでの時間はほとんど変わらないことがわかる。

次に、リンク2の質量と慣性モーメントの大きさがリンク2の姿勢変化に及ぼす影響について考察する。リンク1が姿勢 $\theta_{a1} = -1$ [rad] で静止して、リンク2が姿勢 $\theta_{a2} = 0.5$ [rad] で静止している時刻を $t=0$ [s] として、 $t=300$ [s] になるまでリアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルク τ_2 に $\sin(t)$ を与え続ける数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションの結果を図4.14～図4.17に示す。図4.20はリンク2の質量を $m_{a2}=2.5$ [kg]、リンク2の慣性モーメントを $J_{a2}=0.05$ [kgm²] としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図4.21はリンク2の質量を $m_{a2}=5.0$ [kg]、リンク2の慣性モーメントを $J_{a2}=0.1$ [kgm²] としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図4.22はリンク2の質量を $m_{a2}=1.0$ [kg]、リンク2の慣性モーメントを $J_{a2}=0.02$ [kgm²] としたときの各リンクとリアクションホイールの姿勢と角速度の時間変化の様子を示している。図4.20-(i) と図4.21-(i) の結果からわかるように、リンク2の質量と慣性モーメントが大きいとき、リンク2が回転角度0の姿勢に収束するま

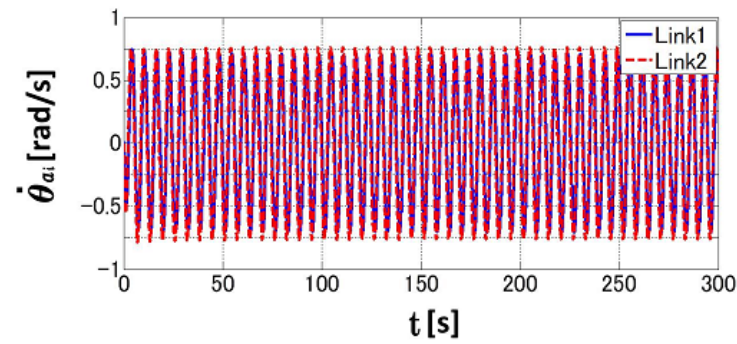
での時間は短くなることがわかる。しかし、図4.21-(i)と図4.22-(i)の結果を見ると、リンク2の質量と慣性モーメントが大きいときリンク2が回転角度0の姿勢に収束するまでの時間は長くなっている。よって、リンク2の質量と慣性モーメントの大きさを適切に選ぶことで、リンク2の姿勢制御の応答性を上げることができるといえる。



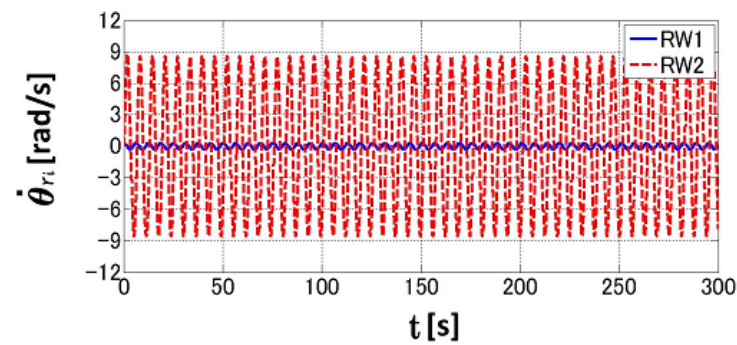
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

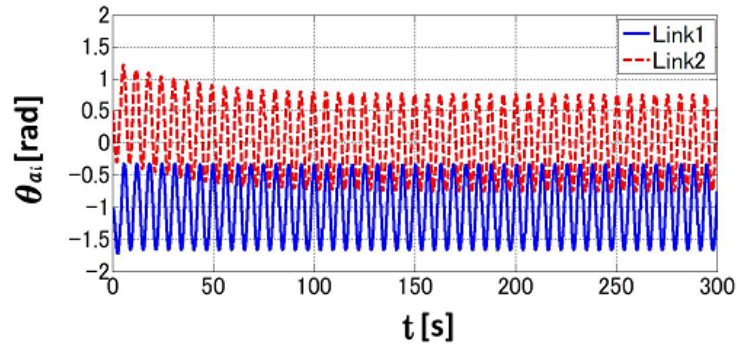


(iii) Angular Velocity of the link

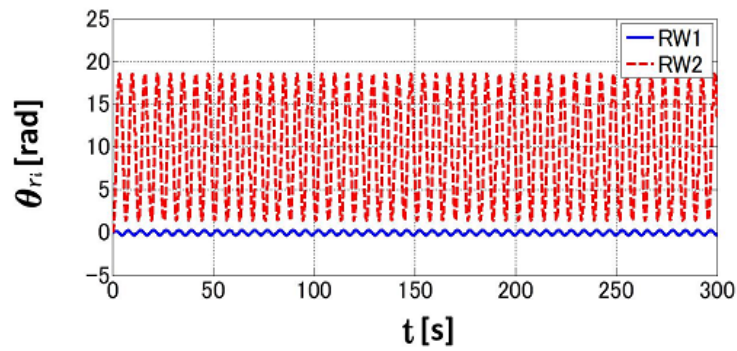


(vi) Angular Velocity of the RW

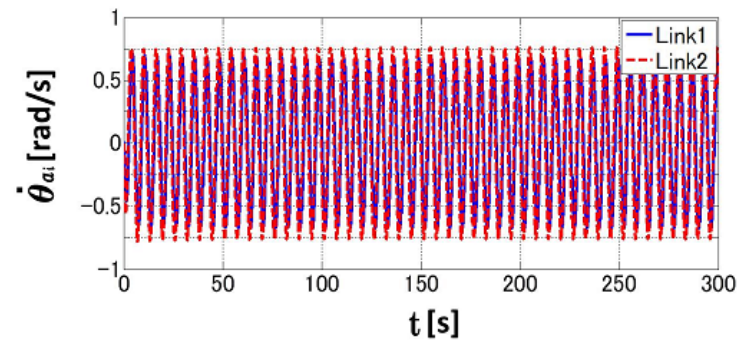
Fig. 4.17: Simulation result with $m_{a1}=1.0$, $J_{a1}=0.02$



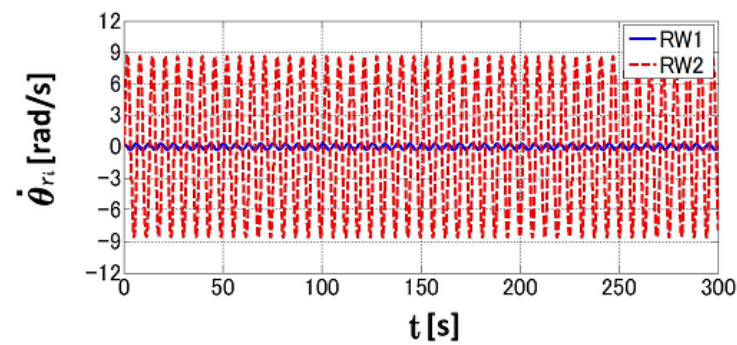
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

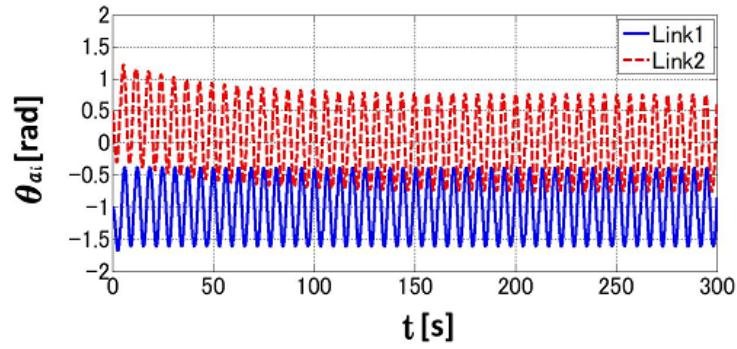


(iii) Angular Velocity of the link

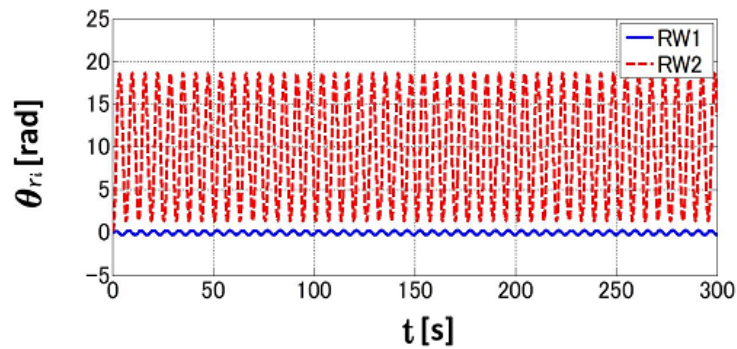


(vi) Angular Velocity of the RW

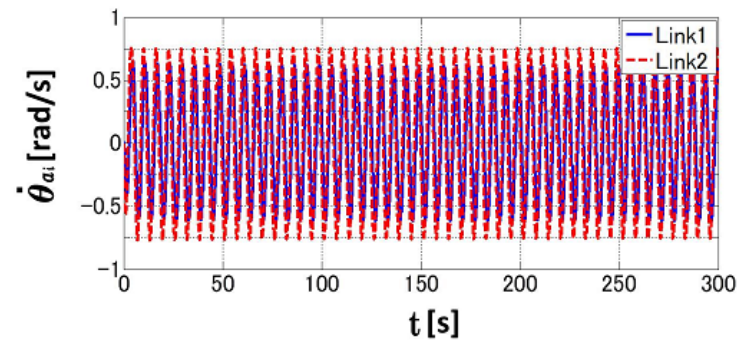
Fig. 4.18: Simulation result with $m_{a1}=2.5$, $J_{a1}=0.05$



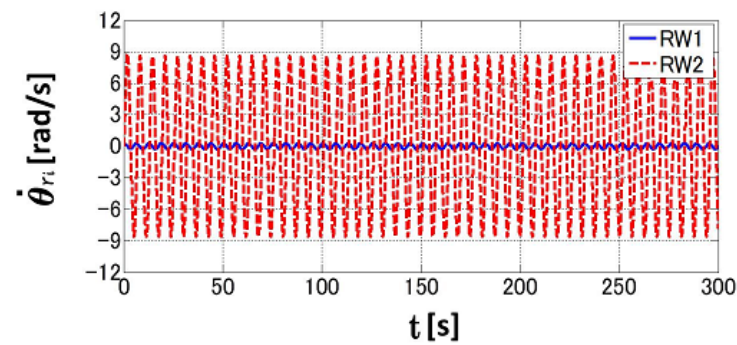
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

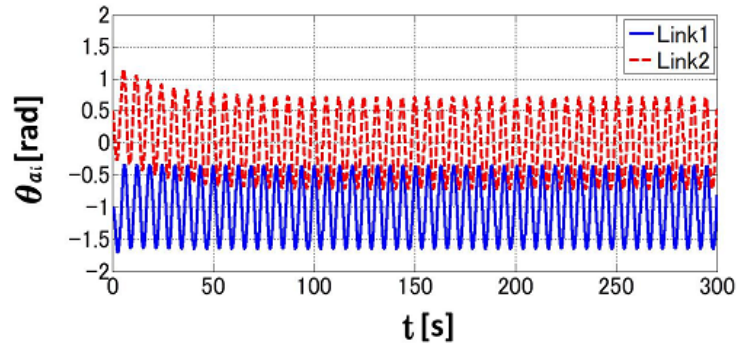


(iii) Angular Velocity of the link

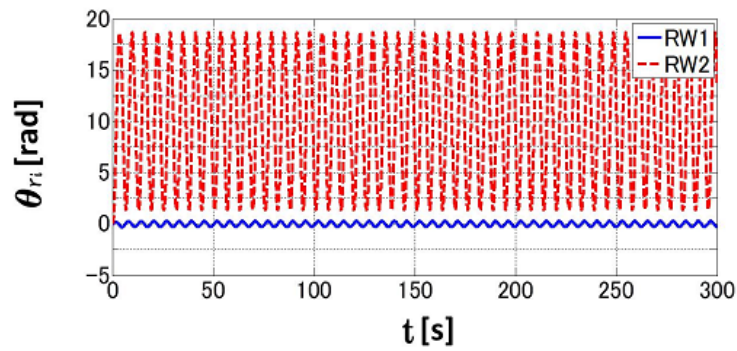


(vi) Angular Velocity of the RW

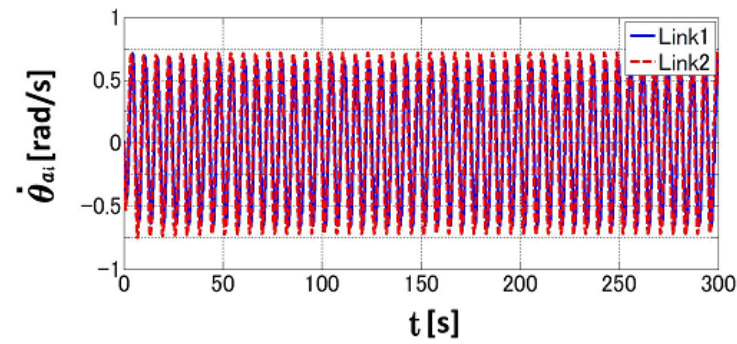
Fig. 4.19: Simulation result with $m_{a1}=5.0$, $J_{a1}=0.1$



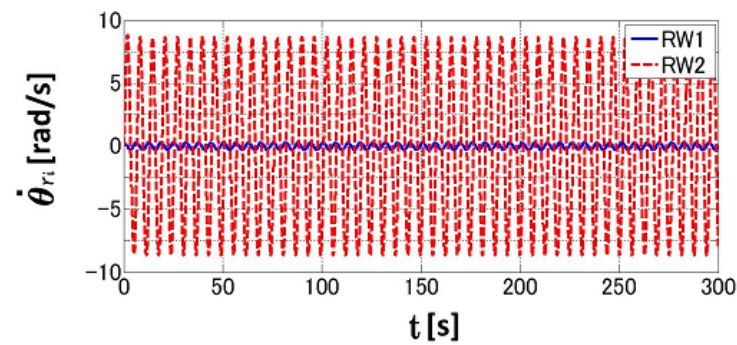
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW

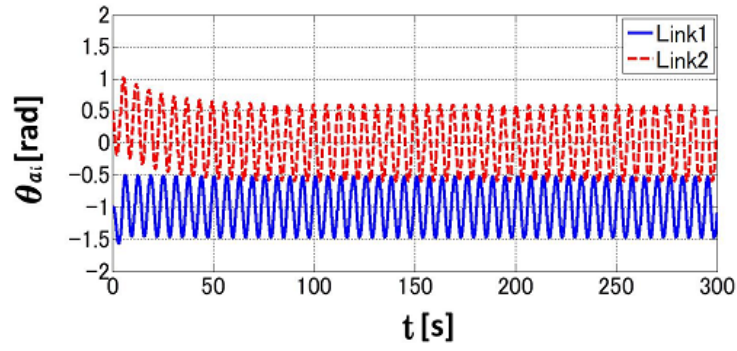


(iii) Angular Velocity of the link

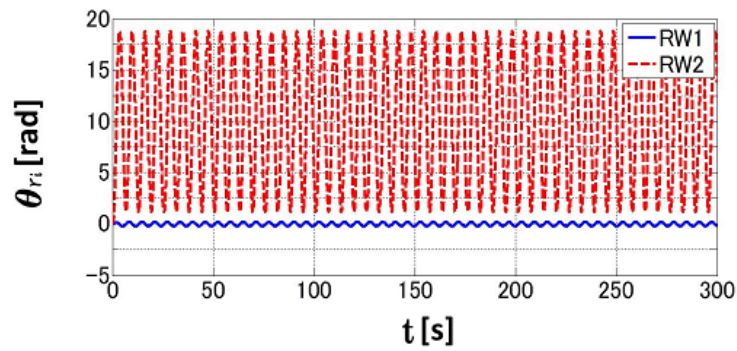


(vi) Angular Velocity of the RW

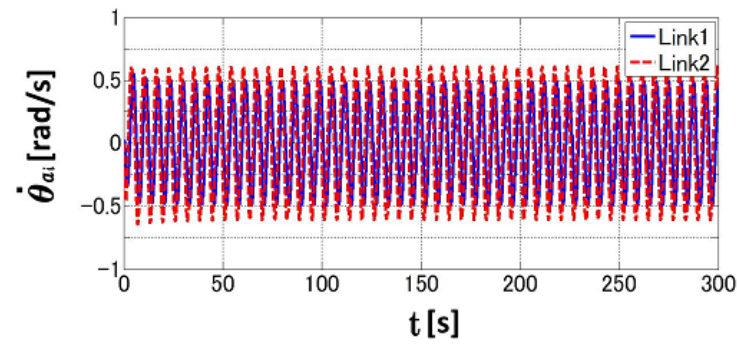
Fig. 4.20: Simulation result with $m_{a2}=1.0$, $J_{a2}=0.02$



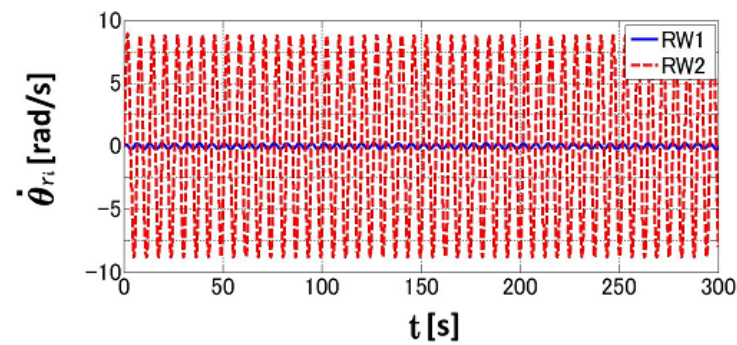
(i) Angle of the body



(ii) Angle of the RW

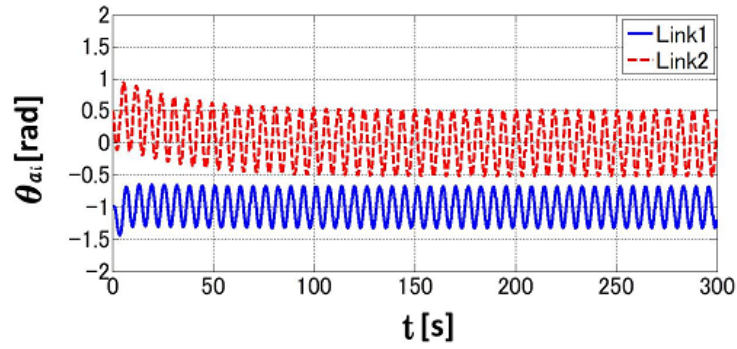


(iii) Angular Velocity of the link

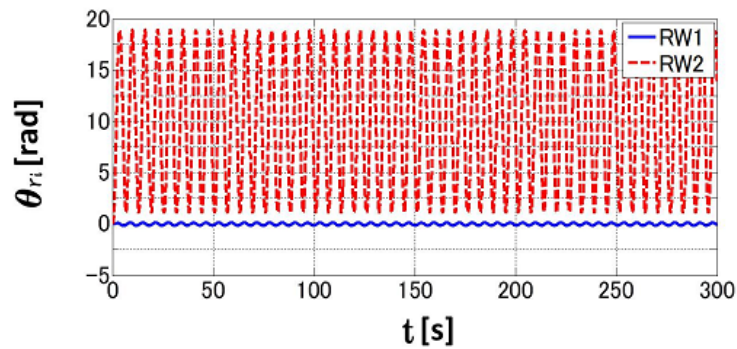


(vi) Angular Velocity of the RW

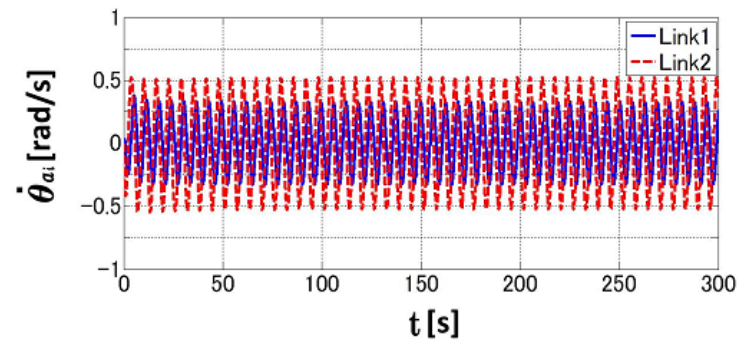
Fig. 4.21: Simulation result with $m_{a2}=2.5$, $J_{a2}=0.05$



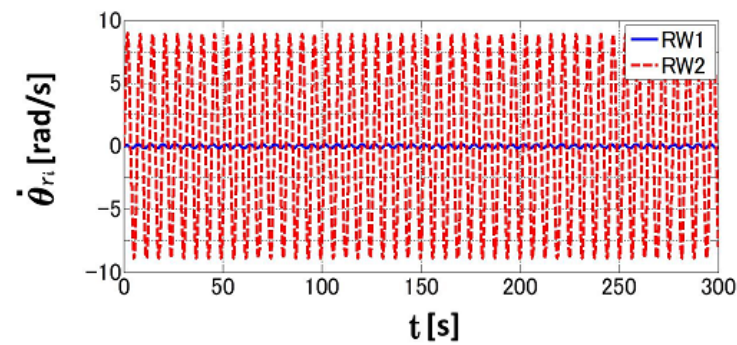
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



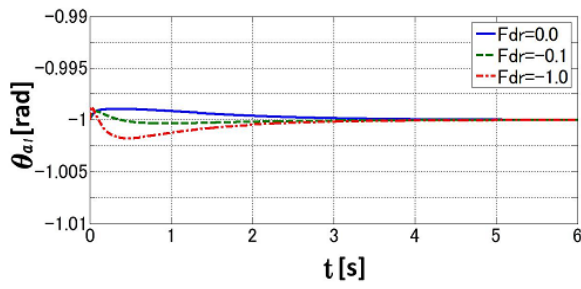
(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 4.22: Simulation result with $m_{a2}=5.0$, $J_{a2}=0.1$

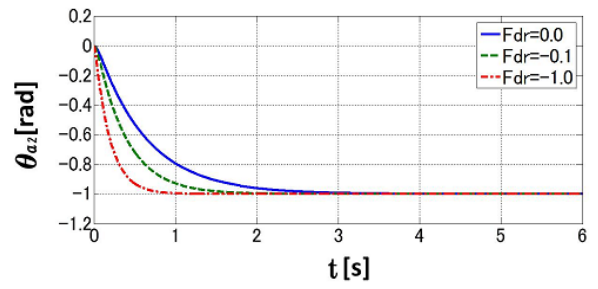
4.5.5 状態フィードバック制御を用いた場合の応答性

【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の <Step0> と <Step5> では、リアクションホイールの回転を止めるために、駆動モータの制御トルクを 0 にして、自然に止まるまで待っている。ここで、リアクションホイールの回転を積極的に制御して止めた場合、駆動モータの制御トルクを 0 にするときと比べて、より大きな反力が発生し、リンクが静止するまでの時間が早くなると考えられる。そこで、リアクションホイールを積極的に止めるために、リアクションホイールの角速度に対する状態フィードバック制御を適用することを試みる。

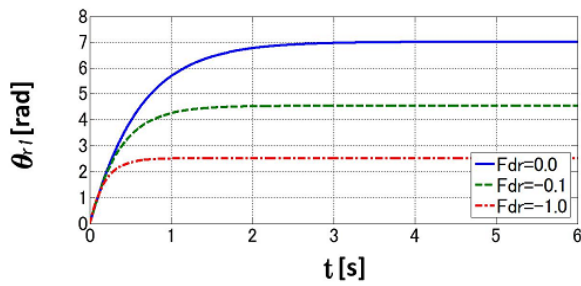
一例として、【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の <Step5> において、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに $\tau_2 = F_{dr}(\dot{\theta}_{r2} - \dot{\theta}_{r2s})(F_{dr}=0.0, -0.1, -1.0)$ を適用したときのリンク 2 の姿勢変化の違いについて数値シミュレーションで確認した。ここで、数値シミュレーションでは、【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の <Step4> が終了して、リンク 1 が姿勢 $\theta_{a1} = -1$ [rad]、リンク 2 が姿勢 $\theta_{a2} = 0$ [rad] で静止しているとき、リアクションホイール RW1 が角速度 $\dot{\theta}_{r1} = 10$ [rad/s]、リアクションホイール RW2 が角速度 $\dot{\theta}_{r2} = -10$ [rad/s] で回転している状態を $t = 0$ [s] とする。数値シミュレーションで用いる系のパラメータは表 4.2 の値を用いた。以上の条件で行った数値シミュレーションの結果を図 4.23 に示す。図 4.23(iv)(viii) より、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに状態フィードバック制御を適用すると、リアクションホイール RW2 の回転は制御トルクを 0 にしたときと比べて早く止まることが確認できる。そして、図 4.23(ii)(vi) より、リアクションホイール RW2 の回転が止まる時間が早いと、リンク 2 は大きな角速度で目標姿勢に収束していることがわかる。よって、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに状態フィードバックを適用することで、提案手法の応答性を向上させることができる。



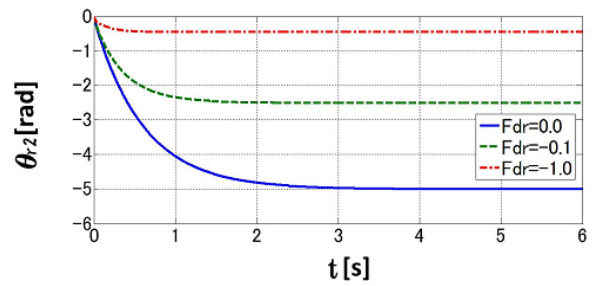
(i) Angle of the link1



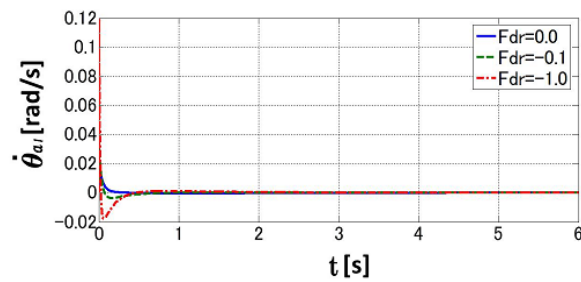
(ii) Angle of the link2



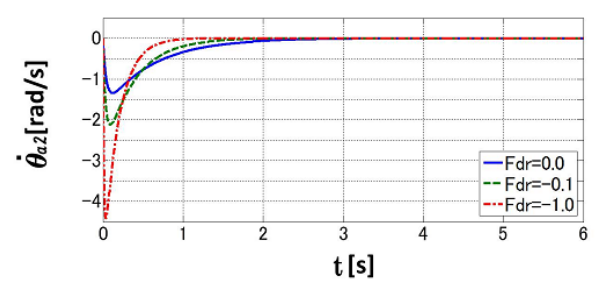
(iii) Angle of the RW1



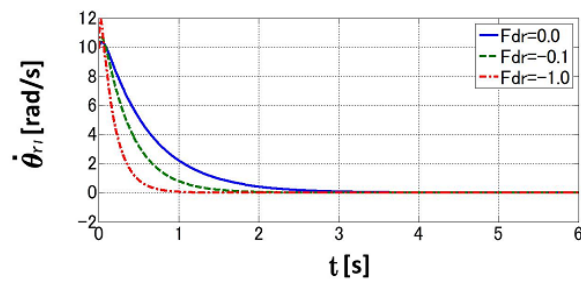
(iv) Angle of the RW2



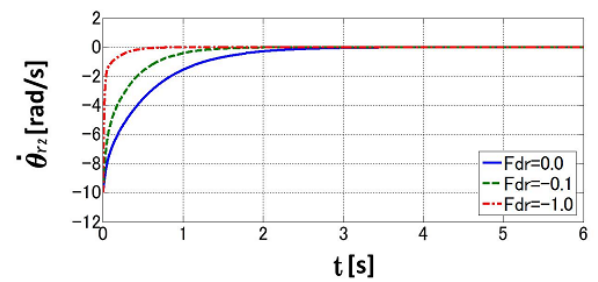
(v) Angular velocity of the link1



(vi) Angular velocity of the link2



(vii) Angular velocity of the RW1



(viii) Angular velocity of the RW2

Fig. 4.23: Simulation result with state feedback control (2-link TUM)

4.5.6 提案手法を用いた姿勢制御における応答性向上の一例

以上の結果から、以下の点を変えることで提案した【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の応答性を向上させることができる。

- (1) 【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】の<Step3>において、定常状態でリアクションホイールの回転を止めるとき、それぞれのリアクションホイールの駆動モータの制御トルクに $\tau_i = F_{dr}\dot{\theta}_{ri}$ ($i=1,2$) を適用する。
- (2) 【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の<Step3>において、リアクションホイール RW2 の駆動モータに与える制御トルクを $\tau_2 = 1.5 \sin(1.5(t-t_s)) + c_{r2}\dot{\theta}_{r2s}$ にする。
- (3) 【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の<Step4>において、リアクションホイール RW2 の駆動モータに与える制御トルクを $\tau_2 = 1.5e^{-(t-t_c)} \sin(1.5(t-t_s)) + c_{r2}\dot{\theta}_{r2s}$ にする。
- (4) 【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の<Step5>において、リアクションホイール RW2 の回転を止めるとき、リアクションホイール RW2 の駆動モータの制御トルクに $\tau_2 = F_{dr}\dot{\theta}_{r2}$ を適用する。

一例として、【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の応答性の向上を確認するため、リンクとリアクションホイールの初期姿勢を $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 、目標姿勢を $\mathbf{x}_d = [-1 \ -1 \ \theta_{r1d} \ \theta_{r2d}]^T$ (θ_{r1d} , θ_{r2d} は未定の定数) として数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションで使用するリンク1の回転軸に働く粘性摩擦係数は $c_{a1} = 0.5$ [kg m²/s] と $\tilde{c}_{a1} = 0.1$ [kg m²/s] とした。その他のパラメータは表4.1の値を使用した。ここで、【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】の<Step0>において、目標とする式(4.9)と式(4.10)の交点は $P(\theta_{a1s}, K_s) = (0.25, -0.125)$ である。ここでは、簡単のためにそれぞれのリアクションホイールの駆動モータに同じ大きさの制御トルクを加えて $K_s = -0.125$ の角運動量を持たせることにする。よって、【リンク1を目標姿勢に制御するアルゴリズム】の<Step2>では、それぞれのリアクションホイールの駆動モータに制御トルク $\tau_i = c_{ri}\dot{\theta}_{ris} = -0.125$ [Nm] ($i = 1, 2$) を加える。また、【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の<Step1>において、リンク2の目標姿勢 $\theta_{a2d} = -1$ [rad] に対してリアクションホイール RW2 が式(4.11)の関係を満たすときの角速度は $\dot{\theta}_{r2s} = -10$ [rad/s] となる。よって、【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の<Step2>では、リアクションホイール RW2 の駆動モータに制御トルク $\tau_2 = c_{r2}\dot{\theta}_{r2s} = -1$ [Nm]

を加え、リアクションホイール RW1 の駆動モータに制御トルク $\tau_1 = c_{r1}\dot{\theta}_{r1s} = 1$ [Nm] を加える。ここで、数値シミュレーションで用いるフィードバックゲインの値は $(K_{pa}, K_{da}, F_{dr}) = (100, 100, -1)$ とする。以上の条件で行った数値シミュレーションの結果を図 4.24 に示す。以下に各時刻におけるシステムの挙動の結果を述べる。

・時刻 $(0 \leq t < 15)$ におけるシステムの挙動

リンク 1 の回転軸に働く粘性摩擦係数を $c_{a1} = 0.5$ [kg m²/s] にして、それぞれのリアクションホイールの駆動モータに制御トルク $\tau_i = -0.125$ [Nm] ($i = 1, 2$) を加えてから、それぞれのリアクションホイールが角速度 $\dot{\theta}_{ris} = -1.25$ [rad/s] ($i = 1, 2$) で回転する定常状態になるとき、リンク 1 は回転角度 $\theta_{a1s} = 0.25$ [rad] で、リンク 2 は回転角度 $\theta_{a2s} = 0.125$ [rad] で静止する。

・時刻 $(15 \leq t < 30)$ におけるシステムの挙動

リンク 1 の回転軸に働く粘性摩擦係数を $\tilde{c}_{a1} = 0.1$ [kg m²/s] に変更して、リアクションホイールにおける駆動モータの制御トルクをそれぞれ $\tau_i = -\dot{\theta}_{ri}$ ($i=1,2$) にすると、リンクはそれぞれ初期姿勢に戻る方向に動き出す。その後、それぞれのリアクションホイールが角速度 0 の定常状態になるとき、リンク 1 は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] で、リンク 2 は姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ [rad] で静止する。

・時刻 $(30 \leq t < 50)$ におけるシステムの挙動

リアクションホイール RW2 の駆動モータに制御トルク $\tau_2 = -1$ [Nm] を、リアクションホイール RW1 の駆動モータに制御トルク $\tau_1 = 1$ [Nm] を加えてから、リアクションホイール RW2 が角速度 $\dot{\theta}_{r2s} = -10$ [rad/s] で、リアクションホイール RW1 が角速度 $\dot{\theta}_{r1s} = 10$ [rad/s] で回転する定常状態になるとき、リンク 1 は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] で、リンク 2 は姿勢 $\theta_{a2s} = 1$ [rad] で静止する。

・時刻 $(50 \leq t < 130)$ におけるシステムの挙動

リアクションホイール RW2 における駆動モータの制御トルクを $\tau_2 = 1.5 \sin(1.5(t - t_s)) + c_{r2}\dot{\theta}_{r2s}$ にすると、リンク 1 は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] を中心とした周期運動を、リンク 2 は姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ [rad] を中心とした周期運動を行う。

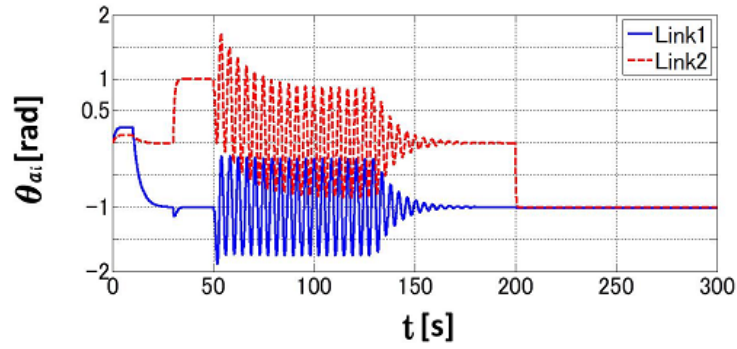
・時刻 $(130 \leq t < 200)$ におけるシステムの挙動

リアクションホイールRW2における駆動モータの制御トルクを $\tau_2 = 1.5e^{-(t-t_c)} \sin(1.5(t-t_s)) + c_{r2}\dot{\theta}_{r2s}$ にすると、それぞれのリンクが行っている周期運動の振幅は時間と共に減衰していき、リンク1は目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] に、リンク2は姿勢 $\theta_{a2s} = 0$ [rad] に収束していく。

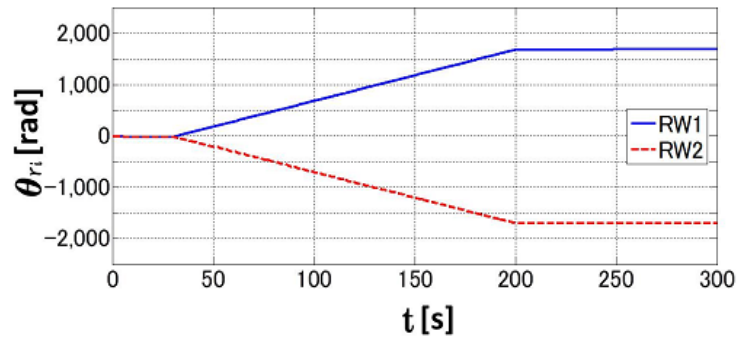
・時刻 ($200 \leq t < 210$) におけるシステムの挙動

リアクションホイールRW1における駆動モータの制御トルクに状態フィードバック制御則 $\tau_1 = K_{pa}(\theta_{a1} - \theta_{a1s}) + K_{da}\dot{\theta}_{a1}$ を適用しながらリアクションホイールRW2における駆動モータの制御トルクを $\tau_2 = F_{dr}\dot{\theta}_{r2}$ にすると、リンク1はリンク2の回転反力によって微動するが、すぐに状態フィードバック制御の効果で目標姿勢 $\theta_{a1d} = -1$ [rad] に収束して留まり続ける。その後、それぞれのリアクションホイールの角速度は0となり、リンク2は目標姿勢 $\theta_{a2d} = -1$ [rad] で静止する。

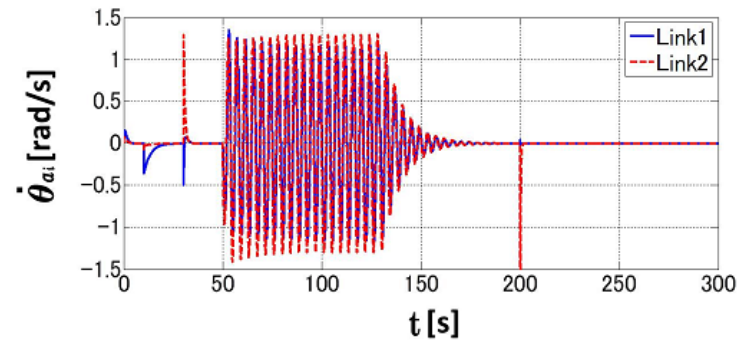
図4.24の結果は、図4.7の結果と比べると、それぞれのリンクとリアクションホイールが目標状態に収束するまでの時間が約80[s]短くなっていることがわかる。以上の結果から、【2リンク TUM の制御アルゴリズム】の応答性の向上を確認することができた。



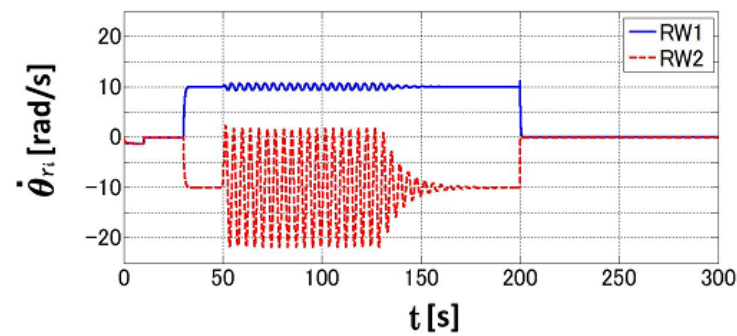
(i) Angle of the link



(ii) Angle of the RW



(iii) Angular Velocity of the link



(vi) Angular Velocity of the RW

Fig. 4.24: Improve the control response

第5章 結言

本研究では、トルクユニットで駆動する非駆動関節持つ回転リンク系を対象に、環境からの摩擦が系の姿勢制御に与える影響について考察を行った。

まず、第2章では、水上に浮かぶ浮遊機械の姿勢制御問題について検討した。水からの粘性摩擦の影響を受ける浮遊機械の場合、トルクユニットを用いて姿勢制御を行うと、定常状態になったときにトルクユニットのリアクションホイールに一定の角運動量が残留し、機体は目標姿勢に対して定常誤差を残して静止することを数値シミュレーションにより確認した。またさらに、その定常状態でトルクユニットの駆動力を零にすると、リアクションホイールの回転は止まる一方で、機体は姿勢制御を行う直前の初期姿勢に戻る現象が生じることを数値シミュレーションで確認した。そして、この現象が環境から受ける粘性摩擦の影響によって起こることを解明した。次に、アンローディングの問題を解決するための一つの手段として、リアクションホイールが一定の角速度で回転して定常状態になっているときに、浮遊機械が環境から受ける粘性摩擦の大きさを変更する機構を利用することで、リアクションホイールに蓄えられている運動エネルギーを浮遊機械の姿勢制御に利用する手法を提案した。そして、検証実験により、提案手法の実施可能性を確認した。

第3章では、非駆動関節を有する平面1リンクマニピュレータにトルクユニットを1機取り付け付けた系を対象に、その姿勢制御問題について検討した。このような系は、関節にモータを取り付けている一般的なマニピュレータのように状態フィードバック制御によってリンクを任意の目標姿勢に制御しようとするとき、リンクは目標姿勢に対して定常誤差を生じ、リアクションホイールに一定の角運動量が残留する。この角運動量の残留を解消するための方法として、第2章で提案した制御手法を応用し、検証実験により提案手法の実施可能性を示した。

第4章では、全ての関節が非駆動な平面2リンクマニピュレータの各リンクにトルクユニットが1機ずつ取り付け付けた系を対象に、その姿勢制御問題について検討した。まず、それぞれのリンクを任意の目標姿勢に制御するために、簡単な非線形状態フィードバック制御を適用した場合のリンクの回転角度とリアクションホイールの角速度を数値シミュレーションにより確認した。そして、定常状態におけるリ

リンクの回転角度とリアクションホイールの角速度の関係を考察した。次に、制御手法を考える上での第一段階として、第2リンクの姿勢を無視して、第1リンクの姿勢のみ目標姿勢に制御することを試みた。第1リンクの姿勢は、第1リンクの回転軸に働く粘性摩擦を可変にすることで目標姿勢に制御することが可能であることを示した。さらに、第2リンクを第2リンクの上にあるトルクユニットのリアクションホイールの角運動量を利用して目標姿勢に制御することを試みた。第2リンクの姿勢は、第2リンクの上のトルクユニットの制御トルクに周期入力を加えることで、目標姿勢に制御することが可能であることを示した。そして、これらの考えを発展させて、第1リンクと第2リンクの両方を任意の初期姿勢から目標姿勢に制御する手法を提案し、数値シミュレーションにより提案手法の有用性を確認した。

本研究は、トルクユニットで駆動する回転リンク系の姿勢制御において、これまで考慮されていなかった粘性摩擦の影響について解明し、さらに粘性摩擦を積極的に利用した制御手法を提案した。これらの成果は、トルクユニットで駆動する回転リンク系の姿勢制御を考える上で重要な知見であるといえる。また、本論文で提案した手法は、システムの物理パラメータの値が不確かであっても実現可能な制御手法となっている。提案手法を実システムに適用する場合、あらかじめ知っておく必要のある値は、式(2.8)と式(2.10)と式(3.3)と式(3.4)と式(4.9)と式(4.10)、式(4.11)の右辺の式に掛かる係数 $(-c_1/J_d, -\tilde{c}_1/J_d, -c_a/J_r, -\tilde{c}_a/J_r, -c_{a1}, -\tilde{c}_{a1}, -c_{a2}/J_{r2})$ の値である。そのため、あらかじめ実験によって、定常状態におけるリアクションホイールの角速度とリンクの回転角度の変化量の関係を求めておき、再現性を保障できれば、精度よく目標状態に制御できると考えられる。もし、予測していない外乱の影響で精度が劣化した場合は、提案手法を繰り返し行うことで目標誤差は小さくできると考えている。また、提案手法は、リンクの慣性モーメントの大きさが変化しても、リンクの位置決め精度が劣化しないという特徴を有する。さらに、トルクユニットマニピュレータにおいては、リンクの慣性モーメントの大きさによっては、関節にモータが取り付けられている一般的なマニピュレータと比較して、姿勢制御における駆動モータが消費するエネルギーを抑えることができる可能性がある。これらの特徴は、トルクユニットマニピュレータは、宇宙空間での作業や、荷物の運搬などを行う際に有効的な利用が期待できると言える。

今後の課題として、以下のものがあげられる。

- ・平面2リンクトルクユニットマニピュレータを対象に、実システムを用いた検証実験を行い、本論文で提案した手法の実施可能性を確認する。

- ・ 平面 2 リンクトルクユニットマニピュレータの姿勢制御において，制御トルクに周期入力を用いた場合のリンクの姿勢変化についての物理的な解析を行い，制御目標を達成するために必要な周期入力の条件を求める．
- ・ クーロン摩擦などの他の摩擦影響も考慮した場合の姿勢制御法の検討 [41]．

参考文献

- [1] 垂直多関節ロボット TVL500, 東芝機械株式会社, <http://www.toshiba-machine.co.jp/jp/product/robot/lineup/tv/TVL500.html>, (参照 2015-12-10)
- [2] 垂直多関節型, 三菱電機株式会社, <http://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/rbt/robot/pmerit/vertical/index.html>, (参照 2015-12-10)
- [3] 6軸(垂直多関節型)ロボット(S5シリーズ), セイコーエプソン株式会社, <http://www.epson.jp/prod/robots/products/6axis/>, (参照 2015-12-10)
- [4] スカラロボット TH250A, 東芝機械株式会社, <http://www.toshiba-machine.co.jp/jp/product/robot/lineup/th/th250a.html>, (参照 2015-12-10)
- [5] 水平多関節型, 三菱電機株式会社, <http://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/rbt/robot/pmerit/horizontal/index.html>, (参照 2015-12-10)
- [6] スカラロボット(LSシリーズ), セイコーエプソン株式会社, <http://www.epson.jp/prod/robots/products/scara/>, (参照 2015-12-10)
- [7] 荒井裕彦, 館: 非駆動関節を有するマニピュレータの動的制御, 日本機械学会論文集(C編), Vol.57, No.534, pp.277-282, (1991)
- [8] H.Arai, and S.Tachi, : Position Control of a Manipulator with Passive Joints Using Dynamic Coupling, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.7, No.4, pp.528-534, (1991)
- [9] 吉川恒夫, 小林啓吾, 渡辺哲陽, 非ホロノミックな拘束を持つ3自由度マニピュレータの目標軌道の生成と収束制御, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.4, pp.584-589, (2000)
- [10] T. Yoshikawa, K. Kobayashi, and T. Watanaabe, Design of a Desirable Trajectory and Convergent Control for 3-D.O.F Manipulator with a Nonholonomic Con-

straint, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Vol.2, No.2000, pp.2684-2689, (2000)

- [11] 鈴木高宏, 三好渉, 中村仁彦, 非ホロノミック自由関節マニピュレータの制御, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4, pp.499-509, (2001)
- [12] T. Suzuki, and Y. Nakamura, :Control of Nonholonomic Free-Joint Manipulator with One Actuator, IEEE/RSJ Int. Conf. on Inteligent Robots and Syatems (Iros), pp.127-132, (2001)
- [13] 小林啓吾, 井村順一, 吉川恒夫, 1つの非駆動関節を持つ平面劣駆動マニピュレータの可制御性, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.8, pp.1167-1172, (1999)
- [14] 美田勉:非線形制御入門-劣駆動ロボットの技能制御論, pp.88-94, 明晃堂, (2000)
- [15] 吉田靖夫, 若松宗和:先端に慣性ロータを用いた自由関節を有する平面2リンクアームの軌道制御, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.65, No.632, pp.215-219, (1996)
- [16] 大須賀公一, 吉田浩治, 小野敏郎:トルクユニットマニピュレータの提案, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.7, pp.1018-1025, (1996)
- [17] 大須賀公一, 野原智功, トルクユニットマニピュレータの軌道計画による姿勢制御-非ホロノミック系としての取り扱い-, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.4, pp.612-615, (2000)
- [18] 吉田浩治, 大須賀公一:トルクユニットマニピュレータの全状態変数を制御するための運動軌道に関する考察, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.7, pp.1108-1117, (2007)
- [19] 吉田浩治, 片山洋太郎, 衣笠哲也, 福田謙吾, 大須賀公一:トルクユニットマニピュレータの一つの制御方策, システム制御情報学会論文誌, Vol.26, No.2, pp.74-83, (2013)
- [20] 志藤嘉信, 柳基鎬, 猪岡光:自由関節を有する2リンクアームの摩擦を利用した位置制御, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.62, No.595, pp.173-178, (1996)

- [21] 瀬戸山康之, 林良太, 余永, 衣笠哲也, 吉田浩治, 大須賀公一: 環境との摩擦を考慮した回転リンク系のトルクユニットを用いた姿勢制御についての一考察, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2012, 2A1-C02(4).
- [22] 林良太, 瀬戸山康之, 余永, 衣笠哲也, 吉田浩治, 大須賀公一: トルクユニットで駆動する平面回転リンク系の環境との摩擦を考慮した姿勢制御について, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.79, No.808, pp.4692-4704, (2013)
- [23] 瀬戸山康之, 林良太, 余永, 衣笠哲也, 吉田浩治, 大須賀公一: 環境との摩擦を考慮した1リンクトルクユニットマニピュレータの姿勢制御-リアクションホイールに残留する角運動量と環境との摩擦-, 第56回自動制御連合講演会, 講演番号1011, pp.822-827, (2013) .
- [24] 瀬戸山康之, 林良太, 余永, 衣笠哲也, 吉田浩治, 大須賀公一: トルクユニットマニピュレータの摩擦を利用した姿勢制御について, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014, 1P2-P06(4).
- [25] Yasuyuki Setoyama, Ryota Hayashi, Yong Yu, Tetsuya Kinugasa, Koji Yoshida and Koichi Osuka : Posture control of one-link torque unit manipulator under friction condition relation between angular momentum of a reaction wheel and friction condition -, Proceedings of ISCIE/ ASME 2014 International Symposium on Flexible Automation, Vol.CD-ROM, No.ISFA2014-117L, pp. 1-8, (2014) .
- [26] 瀬戸山康之, 林良太, 余永, 衣笠哲也, 吉田浩治, 大須賀公一: 粘性摩擦の影響を考慮した平面2リンクトルクユニットマニピュレータの姿勢制御-アンローディングにおけるリンクの揺動が姿勢制御に及ぼす影響-, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2015, 1P1-B08(4)
- [27] 瀬戸山康之, 林良太, 余永, 衣笠哲也, 吉田浩治, 大須賀公一: 平面2リンクトルクユニットマニピュレータの粘性摩擦の影響を考慮した姿勢制御法, 日本機械学会論文集 (DOI:10.1299/transjsme.15-00067), Vol.81, No.827, pp.1-14, (2015)
- [28] 吉江宗生, 藤田勇, 竹崎健二, 加藤直三, 千賀英敬, 奥山悦郎: 浮流重油自動追従ブイの実海域試験, 海洋開発論文集, Vol.24, pp.1057-1062, (2008)
- [29] 漂流型海洋気象ブイロボット, 国土交通省気象庁, <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/buoy/buoy-info.html>, (参照 2015-12-10)

- [30] 大気を調べる，国立研究開発法人海洋研究開発機構，
<http://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/observe/atomosphere.html>，（参照
2015-12-10）
- [31] 金岡克弥，黒岩秀幸，川村貞夫：水中ロボットにおけるフライホイール角運動量
制御のための軌道計画手法，第8回計測自動制御学会システムインテグレーション
部門講演会講演論文集，pp.241-242，（2007）
- [32] 北側能，掘込泰雄，小川侑一：自動制御工学，pp.162-168，森北出版株式会社，
（2008）
- [33] 小郷寛：システム制御理論入門，pp.85-140，実教出版，（1979）
- [34] 田中幹也，石川昌明，浪花智英：現代制御の基礎，pp.19-33，森北出版株式会社，
（2008）
- [35] 永井裕：人工衛星「ロケットから放送衛星まで」，pp.138-167，電気書院，（1991）
- [36] 茂原正道，宇宙工学入門-衛星とロケットの誘導・制御-，pp.61-84，培風館，（1994）
- [37] 古荘純次，ER流体を用いたメカトロニクス機器の制御，計測と制御，Vol.34，
No.9，pp.687-691，（1995）
- [38] 間島達雄，戸森央貴，永井豪，中村太郎，大隅久，可変粘弾性関節を有するマ
ニピュレータの瞬発力を伴う動作の制御，ロボティクス・メカトロニクス講演会
講演概要集2013，2A2-D02(4)
- [39] 吉川恒夫：ロボット制御基礎論，pp.73-85，コロナ社，（2009）
- [40] 中村仁彦，岩本隆史，吉本堅一，ドリフト項をもつ非ホロノミック機械の制御，
日本ロボット学会誌，Vol.13，No.6，pp.830-837，（1995）
- [41] 林良太，肥田昭：クーロン摩擦による位置決め制御に関する一考察，日本機械
学会論文集（C編），Vol.64，No.627，pp.4278-4283，（1998）

謝辞

本研究を行うにあたり，多忙な中，多大な協力とご指導ご鞭撻をしてくださった主査の鹿児島大学林良太准教授に深く感謝いたします。

また，お忙しい中，同じ研究グループとして数々の貴重な助言をしてくださった副査の鹿児島大学余永准教授に心から感謝の意を表します。

さらに，本論文をまとめるにあたり，副査として数々の有益な助言をしてくださった鹿児島大学木下英二教授および松崎健一郎教授に心より感謝しお礼申し上げます。

そして，共同研究者として数々の貴重なご意見をいただきました岡山理科大学吉田浩治教授，衣笠哲也教授および大阪大学大須賀公一教授に心より感謝しお礼申し上げます。

また，装置を製作する際に的確な指導と協力をしてくださった鹿児島大学工場の先生方に感謝の意を表します。

最後に，共に励み切磋琢磨してきた同研究室の学生に感謝し，本論文の謝辞とさせていただきます。