

修士学位論文

斜面における蛇型ロボットの蛇行移動
の運動解析

平成 15 年度

茨城大学大学院 理工学研究科

システム工学専攻

指導教官 馬 書根
学籍番号 02NM928H
氏 名 田所 直樹

目次

第1章	序論	1
1.1	蛇の特徴	2
1.2	蛇の移動形態	3
1.3	従来の研究	4
1.4	本研究の目的	6
1.5	本論文の内容	7
第2章	2次元斜面蛇行移動定式化	9
2.1	はじめに	10
2.2	運動学基本式	10
2.3	動力学基本式	12
2.3.1	トルクの関係式	14
2.3.2	力の関係式	15
2.4	蛇ロボットの運動及び関節トルクの導出	16
2.5	まとめ	17
第3章	3次元斜面蛇行移動定式化	19
3.1	はじめに	20
3.2	蛇型ロボットモデル	20
3.3	斜面における運動学基本式	21
3.4	斜面における動力学基本式	23
3.4.1	ニュートン・オイラーの方程式	23
3.4.2	モーメントの関係式	23
3.4.3	トルクの関係式	25
3.4.4	力の関係式	26
3.4.5	動力学基本式	27
3.5	逆動力学	27
3.6	外力	27
3.7	まとめ	28
第4章	体形曲線及び外部環境の定式化	29
4.1	はじめに	30

4.2	体形曲線	30
4.2.1	定形な体形曲線	30
4.2.2	不定形な体形曲線	31
4.3	クーロン摩擦力	33
4.4	まとめ	34
第5章	斜面における3次元蛇型ロボットの運動解析	35
5.1	はじめに	36
5.2	動力学解析	36
5.3	2次元平面の拘束条件	36
5.4	抗力一様分布	37
5.5	sinus-lifting 運動	38
5.6	まとめ	40
第6章	シミュレーション及び実機実験	41
6.1	はじめに	42
6.2	2次元斜面蛇行移動解析シミュレーション	42
6.2.1	シミュレーション条件	42
6.2.2	定形な体形曲線と不定形な体形曲線の比較	43
6.3	実機実験	47
6.3.1	実機の機構	47
6.3.2	実験結果	48
6.3.3	リンク数増加の影響	50
6.4	3次元斜面蛇行移動解析シミュレーション	53
6.4.1	シミュレーション及び実機実験の比較	53
6.4.2	関節の自由度の変化による影響	57
6.5	まとめ	61
第7章	結論と今後の課題	63
7.1	結論	64
7.2	今後の課題と展望	64
	謝辞	67
	参考文献	69
	発表論文	73
付録A	関節自由度を変化させた場合の影響の実験結果	75
A.1	2DOF(yaw,pitch) steady motion	76
A.2	2DOF(yaw,roll) steady motion	79
A.3	3DOF steady motion	82

A.4	2DOF(yaw,pitch) 2Dsinus-lifting	86
A.5	2DOF(yaw,roll) 2D sinus-lifting	89
A.6	3DOF 2D-sinus-lifting	92

目 次

1.1	Capability of biological snakes	2
1.2	Snakes movement	3
1.3	Snake as a biological machine	5
1.4	Snake-like robot	6
2.1	Coordinate on a slope	10
2.2	Robot model	10
2.3	Link model	13
3.1	Model of Snake-like robot	20
3.2	Link model	20
3.3	3D-coordinate on a slope	21
3.4	Link model	21
3.5	Link model	23
4.1	Body curve(symmetrical)	31
4.2	Body curve(unsymmetrical)	32
4.3	Unsymmetrical curves determined by the unsymmetrical factor k and the initial value of the winding angle α_0	32
4.4	Coulomb friction	33
4.5	Friction model	34
5.1	Steady motion	38
5.2	Sinus-lifting motion	39
5.3	2D sinus-lifting	39
6.1	Optimal α_0 and ψ (symmetric)	43
6.2	v w.r.t. α_0 and ψ (symmetric)	43
6.3	Simulation to show creeping locomotion on a 10[deg] slope (Sym- metric case)	44
6.4	Optimal α_0 and optimal k due to ψ (unsymmetric)	45
6.5	v w.r.t. α_0 and k in case of the unsymmetrical body shape	45
6.6	Comparison of the velocity between the symmetrical body shape and the unsymmetrical body shape	46

6.7	Joint torques while the snake-like robot creep on the 10[deg] slope in the optimal body shape	46
6.8	Simulation to show creeping locomotion on a 10[deg] slope (Unsymmetric case)	46
6.9	1DOF snake-like robot	48
6.10	Optimal α_0 and ψ (symmetric)	49
6.11	Optimal α_0 and optimal k due to ψ (symmetric)	49
6.12	Experimental results	49
6.13	Experiment to show creeping locomotion on a 10[deg] slope (Symmetric case)	50
6.14	Experiment to show creeping locomotion on a 10[deg] slope (Unsymmetric case)	50
6.15	Influence to body shape change due to the link number	52
6.16	3D Snake robot simulator	53
6.17	Comparison of simulation and experiments	55
6.18	Normal force and curvature(10[deg] slope)	56
6.19	Pitch torques(10[deg] slope)	56
6.20	Yaw torques(10[deg] slope)	56
6.21	Steady motion (10[deg] slope)	56
6.22	Influence of the change of the joint DOF(steady motion)	58
6.23	Influence of the change of the joint DOF(sinus-lifting)	60
A.1	Normal force and curvature	76
A.2	Pitch Torques	77
A.3	Yaw Torques	78
A.4	Normal force and curvature	79
A.5	Roll Torques	80
A.6	Yaw Torques	81
A.7	Normal force and curvature	82
A.8	Pitch Torques	83
A.9	Yaw Torques	84
A.10	Roll Torques	85
A.11	Normal force and curvature	86
A.12	Pitch Torques	87
A.13	Yaw Torques	88
A.14	Normal force and curvature	89
A.15	Roll Torques	90
A.16	Yaw Torques	91
A.17	Normal force and curvature	92
A.18	Pitch Torques	93

A.19 Yaw Torques	94
A.20 Roll Torques	95

ABSTRACT

Biological snakes' diverse locomotion modes and physiology make them supremely adapted for environments. For example, movements in soft ground, concave-convex wasteland, a narrow space, etc. are all possible. Snake-like robots with such high environment-adaptability of a biological snakes have been widely developed.

To increase a snake-like robot's environmental adaptability, in this study we analyze influence of the inclining angle of slope to creeping locomotion of the robot and derive its optimal creeping locomotion curves that are adapted to the given environment. In this paper, we have firstly formulated robot kinematics and dynamics of 2-dimensional robot model, and interaction of the robot with environment on a slope, and developed a 2-dimensional simulator to simulate the creeping locomotion of the robot on a slope. From a viewpoint that the biological snakes generally use unsymmetrical body shape which enlarges winding angle of a tail part on the slope, we have verified the validity of the unsymmetrical body shape applying to the robot by simulation results and experimental results. Consequently, the snake-like robot case is different from the biological snakes' case, in which the unsymmetrical body shape which enlarges winding angle of a head part is effective. In order to compare with the biological snakes, a dynamics model of the robot has been brought close to the biological snakes by increasing number of links. While increasing number of links, the dispersion error of the body curve decreases and the robot speed becomes faster. In the case that number of links is made more than 80, it turns out that the body curve of the same tendency as biological snake is shown. However, it is hard to say that same result as biological snakes was obtained. A 3-dimensional simulator more close to the real robot for analyzing influence of links' rolling moment is required.

In this paper, we then modeled robot kinematics and dynamics of a 3-dimensional robot model and developed a 3-dimensional simulator to analyze the creeping locomotion of the robot on a slope. To verify the validity of this 3-dimensional simulator, we have compared it with 2-dimensional simulator. From the results, it was clearly shown that the influence of the moment on a slope can be taken into consideration by the 3-dimensional snake-like robot model. By using the developed 3-dimensional simulator, it has verified influence of the change of the joint DOF. In the case, steady motion and 2-dimensional sinus-lifting motion were realized by changing a snake-like robot's reaction forces on the slope. In the case of steady motion, it turns out that the movement efficiency does not change no matter that the joint DOF is 2 or 3. In case of 2-dimensional sinus-lifting movement, if it is made 3DOF on a joint, the moment concerning all DOF becomes large and reaction forces are not possibly distributed together with increase of the inclination of a slope. It turns out that the case of 2DOF on a joint shows good result.

要旨

蛇は紐状の単純な形態でありながら、細長く柔軟な屈曲可能な体幹形状を活かすことにより、凹凸の激しい荒れ地、狭い通路、砂地などの軟弱な地盤において移動可能である、このような蛇の能力を有する環境適応性の高い蛇型ロボットが従来から開発され、災害地での探査や救助などといった用途に期待されている。また、蛇型ロボットを効率よく蛇行移動させるために、運動学と動力学的な観点から運動解析もされた。しかし、これらの解析はほとんど水平面において行なったものであり、斜面や凹凸の激しい環境などにおいては十分にされていなかった。

本研究の目的としては、蛇型ロボットの環境適応能力を高めるために斜面における蛇型ロボットの運動解析を行い、その最適蛇行移動体形について検討する。本論文では、まず斜面において蛇型ロボットの2次元モデルにおける運動学、動力学及び外部環境の定式化を行い、その斜面蛇行移動解析を行なった。蛇型ロボットの体形形状が定形な体形曲線と不定形な体形曲線を使った場合の有効性を計算機シミュレーション及び実機実験により検証し、蛇型ロボットは後尾部のくねりを大きくするような不定形な体形を用いている生物の蛇と違って、先頭の方のくねりを大きくするような不定形な体形を用いていることが明らかになった。また、蛇型ロボットの力学モデルを生物の蛇に近づけ、そのリンク数を増やして、体形と滑走速度の変化について検討を行った。リンク数の増加とともに体形曲線の離散化誤差が少なくなり、より滑らかに高速な移動ができることを示し、リンク数を80以上にすると、生物の蛇と同じ傾向の体形を示すことがわかった。しかし、生物の蛇と同じような結果が得られたと言いがたく、リンクモデルを3次元に拡張し、転倒モーメントの影響も考慮した解析が必要である。

そこで、本論文では蛇型ロボットの3次元モデルにおいて2次元モデルと同様に運動学、動力学を行い、その斜面蛇行移動解析を可能にした斜面蛇行移動解析計算機シミュレータを開発した。この3次元斜面蛇行移動解析シミュレータは、関節の自由度の組み合わせが自由に変えられるという特徴を有している。このシミュレータにより、蛇型ロボットの抗力分配を変化させることにより実現する定抗力運動と2次元sinus-lifting運動において、ロボット関節の自由度数を変更した場合の影響を検討した。その結果、定抗力運動の場合では、関節の自由度数とその運動効率に影響ないことを明らかにした。また、2次元sinus-lifting運動の場合では、3自由度関節にすると斜面の傾斜が高くなるにつれすべての自由度にかかるモーメントが大きくなり接地面からの抗力を正しく分配できなくなってしまうため、2自由度関節の方がよいことがわかった。

本論文の最後で、提案した手法における問題点について考察し、手法の改良すべき点について述べる。

第1章 序論

本章では, 本研究の目的を述べ, 蛇型移動ロボットの特徴, 及び従来開発された蛇型ロボットについて述べる.

1.1 蛇の特徴

蛇は紐状の単純な形態でありながらその体幹をくねらせることで様々な環境に適応することができ、車輪型ロボットや歩行型ロボットが移動困難である地形において移動可能である (Fig. 1.1).

- 凹凸の激しい不規則な荒地や、体の大きさの割に狭くて曲がりくねった進路を推進することができる、
- 細長い体幹を硬直化し、力学的に安定な姿勢を保持することによって、クレバスや枝から枝への谷渡り動作を行うことができる、
- 体幹の力を抜き、自重を体幹全体に分散させることにより、沼地や砂地などの軟弱な地盤でも移動することができる、
- 水中と陸上の両方を移動することが可能である、



Fig. 1.1: Capability of biological snakes

1.2 蛇の移動形態

実際の蛇の蛇行形態は、環境に応じて様々な移動形態を持つが、大きくは次の4つに分類することができる。

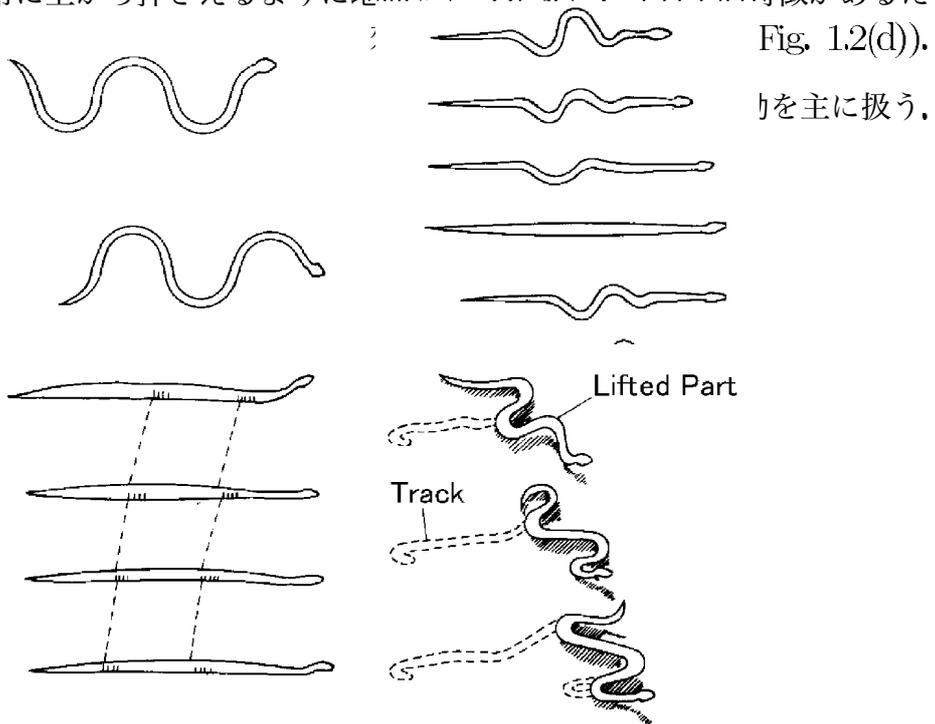
蛇行移動 多くの蛇にみられる移動形態であり、体を連続的に湾曲させて滑走することが特徴である (Fig. 1.2(a)).

アコーディオン式移動 くさり蛇の移動形態であり、それ以外の蛇において幅の狭い直線上の道や非常に滑りやすい床面に置かれたときにみられる。原理的には、静止摩擦係数が動摩擦係数よりも大きいことを利用しており、このため、滑りやすい環境において移動しやすいという利点を持つがその推進効率は低い (Fig. 1.2(b)).

直線式移動 ミミズのように移動する方法で、移動形態としては単純であるが、進行方向に対しての摩擦力が大きいため効率が悪い (Fig. 1.2(c)).

サイドワインダ式移動 滑走中に体幹の一部を浮き上げ、あたかもスパイラルコイルが転がるように推進を行う。この移動形態は体幹と滑走面との滑りがなく体幹は常に上から押さえるように地面をとらえるという力学的特徴があるため、砂地

これらの移動



(c) Concertina movement

(d) Side winding movement

Fig. 1.2: Snakes movement

1.3 従来の研究

生物の蛇の高い環境適応能力を有した蛇型ロボットが開発されている。蛇型移動ロボットは、索状能動体ともよばれ、「能動的に屈曲し得る関節ユニットを直列に多数連結して索状をなしている移動機械」[1]と定義される。

このような蛇の能力を有する環境適応性の高い蛇型移動ロボットは、生物の蛇と同様に入り組んだ環境での移動が期待できるため、災害地での探査や救助などといった用途で期待されている。また、蛇型ロボットは、関節ユニットを直列に多数連結していることから、その冗長な自由度を利用し、移動体としてだけでなく、マニピュレーション作業も行うこともできる。さらに、蛇型ロボットは、ユニットの集合体とみれば、一つのユニットが破損した場合でも他のユニットで補うことができ、信頼性の高いシステムとなり、各ユニットを分離、分散することで協調作業を行うことも期待できる。

従来開発された蛇型移動ロボットを示す。

ACM-R1 各関節にとりつけられたモータにより2次元的に関節角度を変化させ、蛇行により推進する (Fig. 1.3(a))[2].

SNAKEBOT アメリカのNASAで開発された蛇型ロボットであり、主に宇宙空間での作業を目的としている (Fig. 1.3(b))[3].

ACM-R3 1つの関節の自由度は1自由度だが、それぞれのユニットを交互に直交させながら連結していくことにより、全体としては3次元的な運動が可能な蛇型ロボットである。 (Fig. 1.3(c))[4]

GMD SNAKE Robot 伝達機構にワイヤを用い、蛇行移動を行う。また、3次元的な移動が可能で、障害物を越えることができる (Fig. 1.3(d))[5].

OBLIX 各関節に斜旋回機構を持ち、3次元的な移動が可能である (Fig. 1.3(e))[6][7].

NEC Snake-like Robot 各関節には旋回と屈曲の2自由度を持つユニバーサルジョイントが設けられているため、それを能動的に動かすことで3次元的な移動が可能である (Fig. 1.3(f))[8][9].

本研究室においても1自由度関節を有した蛇型ロボットと3自由度関節を有した蛇型ロボットが開発されている (Fig. 1.4)[10][11].1自由度関節を有した蛇型ロボットは、1つのユニットは、モータから歯車を介して関節を振るという単純な機構でありながらそれを多数連結することで、蛇行移動を可能にしている。3自由度関節を有した蛇型ロボットは、蛇が鎌首をもたげるような3次元運動も可能であり、関節の稼働限界角が大きいことと関節が3自由度あることから特異姿勢がないことが特徴である。



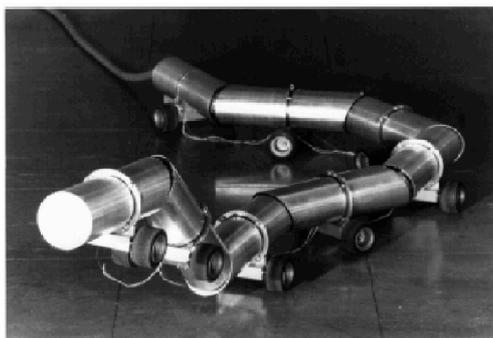
(a) ACM-R1



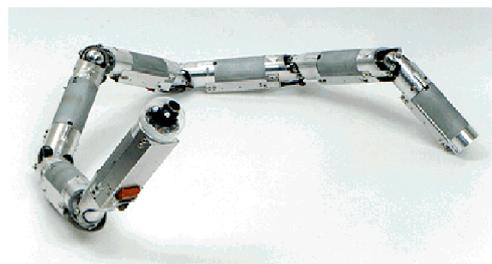
(d) GMD SNAKE Robot



(c) ACM-R3

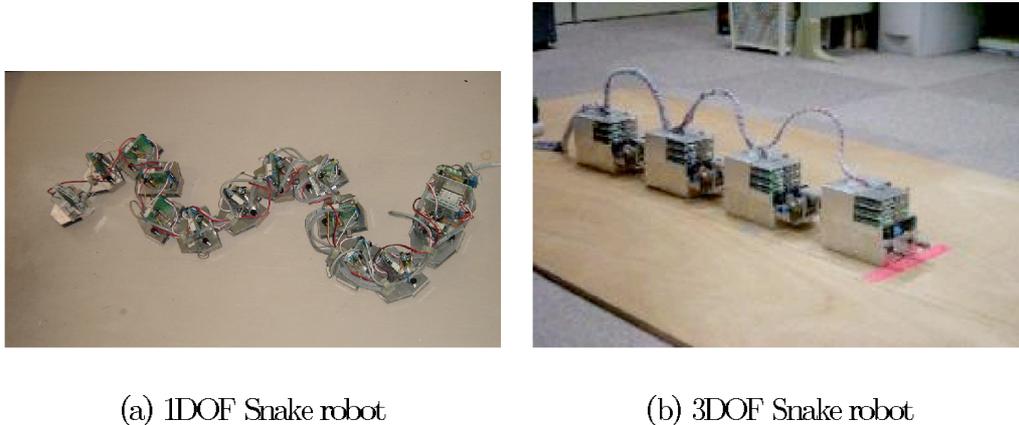


(e) OBLIX



(f) NEC Snake-like Robot

Fig. 1.3: Snake as a biological machine



(a) 1DOF Snake robot

(b) 3DOF Snake robot

Fig. 1.4: Snake-like robot

このように開発された蛇型ロボットを効率よく運動させるため、運動解析や制御について従来から研究されている、運動解析については、運動学的に解析を行ったものや動力的に解析を行ったものがある。運動学的な解析では、蛇型ロボットが法線方向への横滑りを生じないという仮定に基づいて蛇行移動解析を行っている [12],[13][14]。しかし、実際に蛇型ロボットは、外部環境との相互作用により移動しているため、地面の摩擦の影響から法線方向への横滑りを生じている。そこで、外部環境のモデル化をし、動力的に蛇行移動解析をしたものも提案されている [15],[16][17][18]。また、蛇行制御については、平面上で蛇ロボットの先頭位置及び姿勢を制御する手法や3次元的な位置、姿勢を制御する手法が提案されている [19],[20],[21],[22]。しかし、制御を実現するために、車輪を数個取りはずさなければならないことやまた3次元的な姿勢を取る際に持ち上げるリンクの数を固定しなければならないなど拘束が多くなってしまう。また、CPGを用いた体形制御手法も提案されている [23]。これらの研究では、ほとんどが平面においてのものだけであり、3次元的な制御手法は提案されているものの、運動解析については言及されていない。そのため、蛇型ロボットの活躍が期待されている、斜面や凹凸の激しい荒地、水面などの複雑な環境における運動解析はされておらず、そのような環境での最適な運動形態の導出は十分にされていない。

1.4 本研究の目的

本論文では、蛇型ロボットの環境適応能力を高めるため、斜面における蛇型ロボットの運動解析を行い、最適蛇行移動体形について検討する。斜面において、生物の蛇は後尾部のくねりを大きくするような不定形体形を用いている。そこで、まず、不定形体形曲線の有効性をシミュレーション及び実機実験により検証し、斜面におけ

る最適蛇行曲線を導出する。そして、斜面上では、転倒モーメントの影響も考慮に入れ、厳密な斜面蛇行移動解析をするため、リンクモデルを3次元に拡張し解析を行う。また、関節の自由度も変えられるようにし、斜面において蛇型ロボットの最適な自由度の数も導出し、最適な3次元蛇型ロボットの運動形態を明らかにする。

1.5 本論文の内容

本論文では、第2章においてまず、蛇型ロボットが2次元モデルの斜面蛇行移動解析を可能にするため、運動学基本式、及び動力学基本式を導出し、この基本式から、ロボットの運動及び、関節トルクに関する式を定式化する。

第3章においてリンクモデルを3次元に拡張するために、2次元モデルの場合同様に基本式を導出し、3次元斜面蛇行移動解析を可能にする。

第4章では、蛇型ロボットの体形曲線を定形、不定形両方に対応できるように定式化する。また、蛇型ロボットは、外部環境との相互作用により移動しているため、そのモデル化をする。

5章では、3次元蛇型ロボットの運動を地面との抗力分配によって2次元的に実現するため、定抗力運動及び2次元 sinus-lifting 運動を数理計画法により定式化する。

第6章では、前章までで導出した基本式を基に2次元と3次元の斜面蛇行移動解析シミュレータを開発し、これらを用いて蛇型ロボットの最適蛇行形態を導出している。また、実機実験との比較をし、開発したシミュレータの有効性を検証している。

第7章では、本論文の内容を総括し、今後の展望について述べる。

第2章 2次元斜面蛇行移動定式化

2.1 はじめに

蛇型ロボットの斜面蛇行移動解析を2次元モデルで行うために, 運動学基本式, 動力学基本式の定式化をする. 導出した基本式を用いて蛇型ロボットの運動及び関節トルクの導出をする,

2.2 運動学基本式

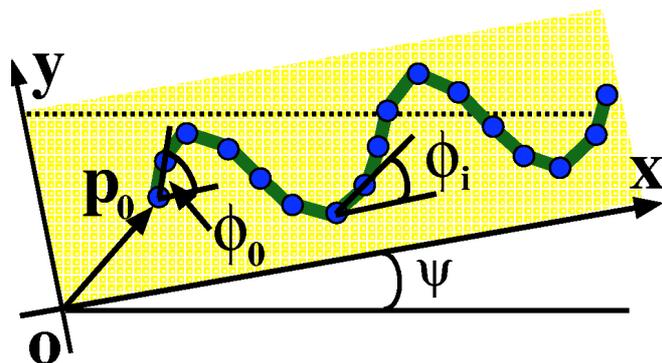


Fig. 2.1: Coordinate on a slope

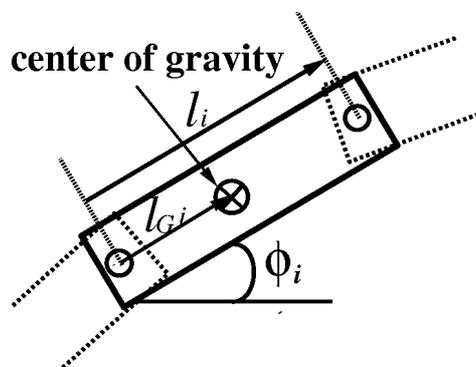


Fig. 2.2: Robot model

傾斜角 ψ の斜面に対して Fig. 2.1 のように斜面の傾斜方向に x 軸, それと垂直で斜面上に y 軸をとる絶対座標系を設定する. 蛇型ロボットの各リンクの絶対角 ϕ_i は, 関節角 θ_i を用いて,

$$\phi_i = \sum_{j=0}^i \theta_j \quad (2.1)$$

と求まる. ただし $\theta_0 = \phi_0$ とする.

また, 絶対座標系上での各関節の位置 $\mathbf{p}_i (i=0 \sim n) \in \mathcal{R}^2$ とリンク i の質量中心の位置 $\mathbf{p}_{Gi} = [x_{Gi}, y_{Gi}]^T \in \mathcal{R}^2$ 及び摩擦作用点の位置 $\mathbf{p}_{fi} = [x_{fi}, y_{fi}]^T \in \mathcal{R}^2$ は以下のように表せる (Fig. 2.2).

$$\mathbf{p}_{i+1} = \mathbf{p}_0 + \sum_{j=0}^i E^{k\phi_j}(\mathbf{l}_j) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{p}_{Gi} = \mathbf{p}_i + E^{k\phi_i}(\mathbf{l}_{Gi}) \quad (2.3)$$

$$\mathbf{p}_{fi} = \mathbf{p}_i + E^{k\phi_i}(\mathbf{l}_{fi}) \quad (2.4)$$

ここで,

$$\mathbf{l}_i = l_i \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l}_{Gi} = l_{Gi} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{l}_{fi} = l_{fi} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

とする. また, Fig. 2.2 に示すように $l_i (= l)$ は i 番目のリンクの長さ, $l_{Gi} (= l_G)$ は関節 i からリンク i の重心への長さ, $l_{fi} (= l_f)$ は関節 i からリンク i の摩擦作用点への長さである. $E^{k\phi}$ は斜面に垂直な軸回りの回転変換行列であり

$$E^{k\phi} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

となる. 式 (2.2), (2.3), (2.4) をそれぞれ時間微分すると, 各関節の速度 $\dot{\mathbf{p}}_{i+1}$ と重心の速度 $\dot{\mathbf{p}}_{Gi}$ 及び摩擦作用点の速度 $\dot{\mathbf{p}}_{fi}$ は

$$\dot{\mathbf{p}}_{i+1} = \dot{\mathbf{p}}_0 + \sum_{j=0}^i E^{k(\phi_j + \frac{\pi}{2})}(\mathbf{l}_j) \dot{\phi}_j \quad (2.7)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{Gi} = \dot{\mathbf{p}}_i + E^{k(\phi_i + \frac{\pi}{2})}(\mathbf{l}_{Gi}) \dot{\phi}_i \quad (2.8)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{fi} = \dot{\mathbf{p}}_i + E^{k(\phi_i + \frac{\pi}{2})}(\mathbf{l}_{fi}) \dot{\phi}_i \quad (2.9)$$

となる. また, 式 (2.7), (2.8), (2.9) を時間微分すると各関節の加速度 $\ddot{\mathbf{p}}_{i+1}$, 重心の加速度 $\ddot{\mathbf{p}}_{Gi}$, 摩擦作用点の加速度 $\ddot{\mathbf{p}}_{fi}$ は

$$\ddot{\mathbf{p}}_{i+1} = \ddot{\mathbf{p}}_0 + \sum_{j=0}^i (E^{k(\phi_j + \frac{\pi}{2})}(\mathbf{l}_j) \ddot{\phi}_j + E^{k(\phi_j + \pi)}(\mathbf{l}_j) \dot{\phi}_j^2) \quad (2.10)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_{Gi} = \ddot{\mathbf{p}}_i + E^{k(\phi_i + \frac{\pi}{2})}(\mathbf{l}_{Gi}) \ddot{\phi}_i + E^{k(\phi_i + \pi)}(\mathbf{l}_{Gi}) \dot{\phi}_i^2 \quad (2.11)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_{fi} = \ddot{\mathbf{p}}_i + E^{k(\phi_i + \frac{\pi}{2})}(\mathbf{l}_{fi}) \ddot{\phi}_i + E^{k(\phi_i + \pi)}(\mathbf{l}_{fi}) \dot{\phi}_i^2 \quad (2.12)$$

となる.

2.3 動力学基本式

蛇型移動ロボットが蛇行移動する際には、地面に固定されたリンクが存在せず、摩擦などの外部環境との相互作用によって、体軸法線方向に滑べりを生じており、蛇型移動ロボットの頭部が通った軌跡を尾が通っていない、このため解析には、動力学と外部環境との相互作用を考慮する必要がある。

そこで、Fig. 2.3(a) に示すリンクモデルのように、斜面蛇行移動であることから重力の影響を考慮し、ニュートン・オイラーの運動方程式によりリンク i の動力学方程式は式 (2.13) のように求められる。

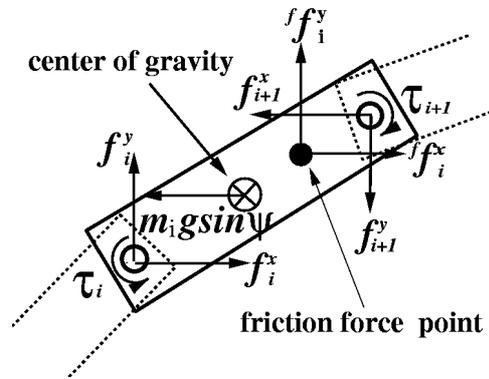
$$\begin{aligned}
 f_i^x + {}^f f_i^x - m_i g \sin \psi - f_{i+1}^x &= m_i \ddot{x}_{G^i} \\
 f_i^y + {}^f f_i^y - f_{i+1}^y &= m_i \ddot{y}_{G^i} \\
 \tau_i - \tau_{i+1} - (l_{f_i} - l_{G^i})(\sin \phi_i {}^f f_i^x - \cos \phi_i {}^f f_i^y) \\
 + (l_i - l_{G^i})(\sin \phi_i f_{i+1}^x - \cos \phi_i f_{i+1}^y) \\
 + l_{G^i}(\sin \phi_i f_i^x - \cos \phi_i f_i^y) &= I_i \ddot{\phi}_i
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

また、蛇型移動ロボット最前部と最後部には、アクチュエータが存在しないため、Fig. 2.3(b), Fig. 2.3(c) に示すリンクモデルからリンク 0 とリンク $n-1$ の動力学方程式は式 (2.14), 式 (2.15) で求められる。

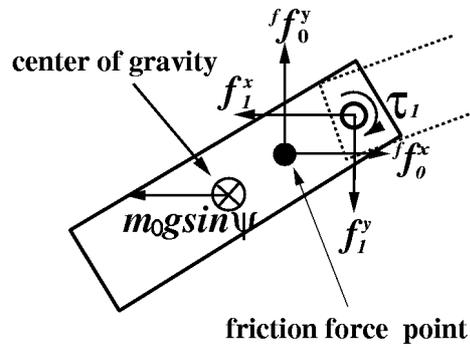
$$\begin{aligned}
 {}^f f_0^x - m_0 g \sin \psi - f_1^x &= m_0 \ddot{x}_{G^0} \\
 {}^f f_0^y - f_1^y &= m_0 \ddot{y}_{G^0} \\
 -\tau_1 - (l_{f_0} - l_{G^0})(\sin \phi_0 {}^f f_0^x - \cos \phi_0 {}^f f_0^y) \\
 + (l_0 - l_{G^0})(\sin \phi_0 f_1^x - \cos \phi_0 f_1^y) &= I_0 \ddot{\phi}_0
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}
 f_{n-1}^x + {}^f f_{n-1}^x - m_{n-1} g \sin \psi &= m_{n-1} \ddot{x}_{G^{n-1}} \\
 f_{n-1}^y + {}^f f_{n-1}^y &= m_{n-1} \ddot{y}_{G^{n-1}} \\
 \tau_{n-1} - (l_{f(n-1)} - l_{G(n-1)})(\sin \phi_{n-1} {}^f f_{n-1}^x - \cos \phi_{n-1} {}^f f_{n-1}^y) \\
 + l_{G(n-1)}(\sin \phi_{n-1} f_{n-1}^x - \cos \phi_{n-1} f_{n-1}^y) &= I_{n-1} \ddot{\phi}_{n-1}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

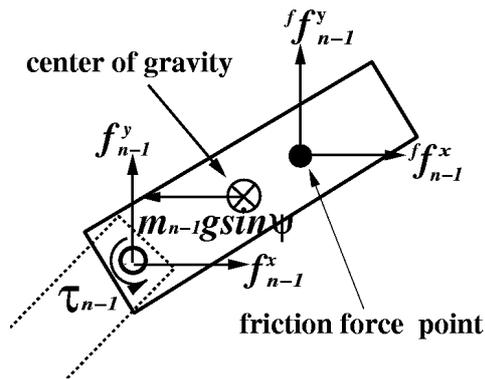
ここで、 ψ は傾斜角、 m_i はリンク i の質量、 I_i はリンク i の慣性モーメント、 f_i はリンク $i-1$ からリンク i に働く力、 ${}^f f_i$ はリンク i に働く摩擦力、 τ_i は関節 i におけるトルクである。



(a) i 番目のリンク



(b) 0 番目のリンク



(c) $n-1$ 番目のリンク

Fig. 2.3: Link model

2.3.1 トルクの関係式

これまでに導出した, 体型曲線, 斜面における運動学基本式, 斜面における動力学方程式により式(2.16)のトルクの関係式と式(2.18)の力関係式を導出することができる. ここで $s_i = \sin \phi_i, c_i = \cos \phi_i$ とする.

$$D\boldsymbol{\tau} = {}^f\boldsymbol{\tau} + {}^0\boldsymbol{\tau} + M_0(\ddot{\boldsymbol{p}}_0 + \boldsymbol{g}) + M\ddot{\boldsymbol{\phi}} \quad (2.16)$$

$\boldsymbol{\tau} \in \mathfrak{R}^{n-1}$: 関節トルク

$\ddot{\boldsymbol{p}}_0 \in \mathfrak{R}^2$: 末端の加速度

$\ddot{\boldsymbol{\phi}} \in \mathfrak{R}^n$: 関節回転加速度

${}^f\boldsymbol{\tau} \in \mathfrak{R}^n$: 摩擦力項

${}^0\boldsymbol{\tau} \in \mathfrak{R}^n$: 遠心力およびコリオリ力項

$M_0 \in \mathfrak{R}^{n \times 2}$: ${}^0\boldsymbol{\mu}$ と \boldsymbol{g} の影響を示す行列

$M \in \mathfrak{R}^{n \times n}$: 慣性行列

$\boldsymbol{g} \in \mathfrak{R}^2$: 重力項

各行列の要素は

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_{n-1}]^T \in \mathfrak{R}^{n-1} \\ \ddot{\boldsymbol{p}}_0 &= [\ddot{x}_0 \ \ddot{y}_0]^T \in \mathfrak{R}^2 \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}} &= [\ddot{\phi}_0 \ \dots \ \ddot{\phi}_{n-1}]^T \in \mathfrak{R}^n \\ D &= \{D_{(i,j)}\} \in \mathfrak{R}^{n \times (n-1)}, D_{(i,j)} = \begin{cases} -1 & i=j \\ 1 & i=j+1 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \\ {}^f\boldsymbol{\tau} &= \{{}^f\tau_{(i)}\} \in \mathfrak{R}^n \\ {}^f\tau_{(i)} &= (l_i \sum_{k=i+1}^{n-1} {}^f f_k^x + l_{f_i} {}^f f_i^x) s_i - (l_i \sum_{k=i+1}^{n-1} {}^f f_k^y + l_{f_i} {}^f f_i^y) c_i \\ {}^0\boldsymbol{\tau} &= \{{}^0\tau_{(i)}\} \in \mathfrak{R}^n \\ {}^0\tau_{(i)} &= l_i \sum_{k=i+1}^{n-1} (m_k l_k^k + l_k \sum_{j=k+1}^{n-1} m_j) \sin(\phi_k - \phi_i) \dot{\phi}_k^2 \\ &\quad - (m_i l_i^i + l_i \sum_{j=i+1}^{n-1} m_j) \sum_{k=0}^{i-1} l_k \sin(\phi_k - \phi_i) \dot{\phi}_k^2 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{M}_0 &= \{M_{0(i)}\} \in \mathfrak{R}^{n \times 2} \\
M_{0(i)} &= (m_i l_{G^i} + l_i \sum_{k=i+1}^{n-1} m_k) \begin{bmatrix} -s_i & c_i \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}^2 \\
\mathbf{M} &= \{M_{(i,j)}\} \in \mathfrak{R}^{n \times n} \\
M_{(i,j)} &= \begin{cases} l_i(m_j l_{G^j} + l_j \sum_{k=j+1}^{n-1} m_k) \cos(\phi_j - \phi_i) & j < i \\ m_i l_{G^i}^2 + I_i + l_i \sum_{k=i+1}^{n-1} m_k & j = i \\ (m_i l_{G^i} + l_i \sum_{k=i+1}^{n-1} m_k) l_j \cos(\phi_j - \phi_i) & j > i \end{cases} \\
\mathbf{g} &= [g \sin \psi \quad 0]^T
\end{aligned}$$

と示される.

2.3.2 力の関係式

$${}^f \mathbf{f} + {}^0 \mathbf{f} + \mathbf{m}_0(\ddot{\mathbf{p}}_0 + \mathbf{g}) + \mathbf{m}\ddot{\boldsymbol{\phi}} = 0 \quad (2.18)$$

${}^f \mathbf{f} \in \mathfrak{R}^2$: リンクに働く摩擦力の総和
 ${}^0 \mathbf{f} \in \mathfrak{R}^2$: 遠心力およびコリオリ力の総和
 $\mathbf{m}_0 \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}$: ${}^0 \mathbf{p}, \mathbf{g}$ の係数行列
 $\mathbf{m} \in \mathfrak{R}^{2 \times n}$: $\ddot{\boldsymbol{\phi}}$ の係数行列

各行列の要素は

$$\begin{aligned}
{}^f \mathbf{f} &= \begin{bmatrix} -\sum_{k=0}^{n-1} {}^f f_k^x & -\sum_{k=0}^{n-1} {}^f f_k^y \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}^2 \\
{}^0 \mathbf{f} &= \begin{bmatrix} -\sum_{k=0}^{n-1} (m_k l_{G^k} + l_k \sum_{j=k+1}^{n-1} m_j) c_k \dot{\phi}_k^2 \\ -\sum_{k=0}^{n-1} (m_k l_{G^k} + l_k \sum_{j=k+1}^{n-1} m_j) s_k \dot{\phi}_k^2 \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^2 \\
\mathbf{m}_0 &= \sum_{k=0}^{n-1} m_k \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2 \times 2}
\end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{m} = \{m_{(j)}\} \in \mathfrak{R}^{2 \times n}$$

$$m_{(j)} = \begin{bmatrix} -(m_j l_{Gj} + l_j \sum_{k=j+1}^{n-1} m_k) s_j \\ (m_j l_{Gj} + l_j \sum_{k=j+1}^{n-1} m_k) c_j \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{2 \times n}$$

と示される,

2.4 蛇ロボットの運動及び関節トルクの導出

(2.1) 式により

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\phi} &= \mathbf{E}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{e}\phi_0 & (2.20) \\ \boldsymbol{\phi} &= [\phi_0 \ \cdots \ \phi_{n-1}]^T \in \mathfrak{R}^n \\ \boldsymbol{\theta} &= [\theta_1 \ \cdots \ \theta_{n-1}]^T \in \mathfrak{R}^{n-1} \\ \mathbf{e} &= [1 \ \cdots \ 1]^T \in \mathfrak{R}^n \\ \mathbf{E} &= \{E_{(i,j)}\} \in \mathfrak{R}^{n \times (n-1)} \\ E_{(i,j)} &= \begin{cases} 1, & i > j \ \& \ i > 1 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \end{aligned}$$

と表せる.

ここで, 蛇型ロボットの体形入力 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ を与え, ロボットの運動を導出する手法を定式化する, (2.18) 式, (2.20) 式から

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{p} &= -\mathbf{m}_0^{-1}\mathbf{m}\ddot{\boldsymbol{\phi}} - \mathbf{m}_0^{-1}({}^f\mathbf{f} + {}^0\mathbf{f}) - \mathbf{g} \\ &= -\mathbf{m}_0^{-1}\mathbf{m}(\mathbf{E}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{e}\ddot{\phi}_0) - \mathbf{m}_0^{-1}({}^f\mathbf{f} + {}^0\mathbf{f}) - \mathbf{g} \end{aligned} \quad (2.21)$$

(2.16) 式に (2.21) 式に代入して

$$\begin{aligned} \mathbf{D}\boldsymbol{\tau} + (\mathbf{M}_0\mathbf{m}_0^{-1}\mathbf{m} - \mathbf{M})\mathbf{e}\ddot{\phi}_0 \\ = {}^f\boldsymbol{\tau} + {}^0\boldsymbol{\tau} - \mathbf{M}_0\mathbf{m}_0^{-1}({}^f\mathbf{f} + {}^0\mathbf{f}) + (\mathbf{M} - \mathbf{M}_0\mathbf{m}_0^{-1}\mathbf{m})\mathbf{E}\ddot{\boldsymbol{\theta}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

となり, (2.21) 式より蛇型移動ロボットの末端部分の x 方向, y 方向加速度が求まり, (2.22) 式から各リンクに働くトルク $\boldsymbol{\tau}$, $\ddot{\phi}_0$ が導出される.

よって, 導出した蛇型ロボットの各関節トルク, 末端部分の加速度, 角加速度を用いることにより斜面における蛇行移動解析が可能となる.

2.5 まとめ

本章では, 斜面において2次元モデルで蛇型ロボットの蛇行移動解析の基本式を導出し, 蛇型ロボットの運動, 及び関節トルクを導出した. これらを用いることで斜面蛇行移動解析が可能になる.

第3章 3次元斜面蛇行移動定式化

3.1 はじめに

関節に働くモーメントの影響やリンクモデルに厚みを考慮することで、より実機に近い解析ができるようにするため、リンクモデルを3次元に拡張し、斜面蛇行移動解析を行う。そこで、2次元モデルの場合と同様、基本式を定式化し、3次元斜面蛇行移動解析を可能にする。

3.2 蛇型ロボットモデル

1. 蛇型ロボットは、 n 個のリンクを繋いだものとし、1 関節1 自由度の回転関節とする。(Fig. 3.1)
2. 蛇型ロボットの1 特定のリンク長をゼロとすることにより、1 関節に多自由度を持たせることが可能である。(Fig. 3.2)
3. 移動する斜面の角度は、既知であるとする。途中で斜面の傾斜が変わる場合の対応は考慮しない。

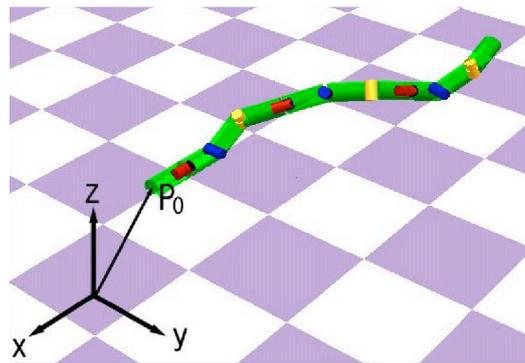


Fig. 3.1: Model of Snake-like robot

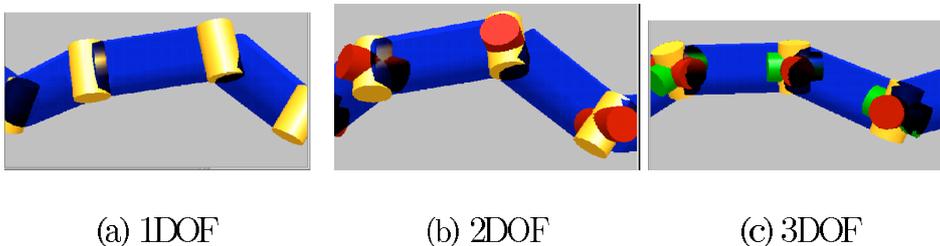


Fig. 3.2: Link model

3.3 斜面における運動学基本式

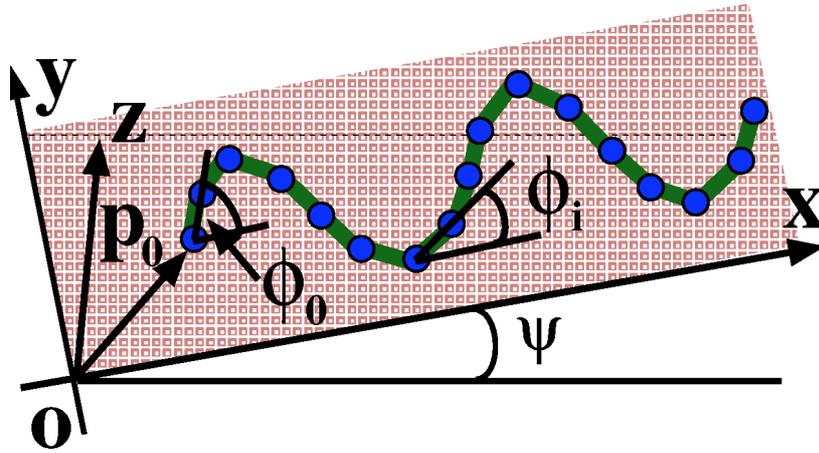


Fig. 3.3: 3D-coordinate on a slope

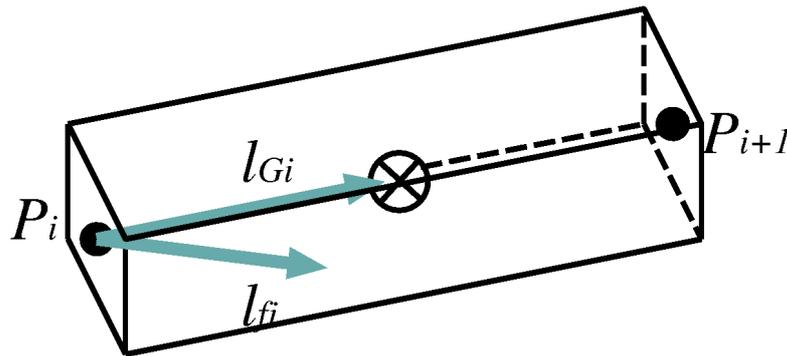


Fig. 3.4: Link model

蛇型ロボットが移動する斜面の座標系を Fig. 3.3 のように設定する, リンクベクトル $\mathbf{l}_i \in \mathbb{R}^3$, 回転軸ベクトル $\mathbf{e}_i \in \mathbb{R}^3$ は各関節角度 θ_i を用いて

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{R}_i \hat{\mathbf{e}}_i \tag{3.1}$$

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{R}_i \hat{\mathbf{l}}_i \tag{3.2}$$

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{x0} \mathbf{R}_{y0} \mathbf{R}_{z0} \prod_{k=0}^i \hat{\mathbf{R}}_k(\theta_k) \tag{3.3}$$

と表せる, ここで $\hat{\mathbf{l}}_i, \hat{\mathbf{e}}_i$ は基準姿勢における任意の位置ベクトル, 回転軸ベクトル, $\mathbf{R}_{x0}, \mathbf{R}_{y0}, \mathbf{R}_{z0}$ は蛇型ロボット全体の姿勢3自由度を表すための回転変換行列, $\hat{\mathbf{R}}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は i 番目の回転軸による回転変換行列である,

各関節位置は $\mathbf{P}_i \in \mathfrak{R}^3$, 速度 $\dot{\mathbf{P}}_i$, 加速度 $\ddot{\mathbf{P}}_i$ は, 先頭の位置 $\mathbf{P}_0 \in \mathfrak{R}^3$, 速度 $\dot{\mathbf{P}}_0$, 加速度 $\ddot{\mathbf{P}}_0$ を用いて

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_0 + \sum_{j=0}^{i-1} \mathbf{l}_j \quad (3.4)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \dot{\mathbf{p}}_0 + \sum_{j=0}^{i-1} (\boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{l}_j) \quad (3.5)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_i = \ddot{\mathbf{p}}_0 + \sum_{j=0}^{i-1} (\dot{\boldsymbol{\omega}}_j \times \mathbf{l}_j) + \{\boldsymbol{\omega}_j \times (\boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{l}_j)\} \quad (3.6)$$

と表せる (Fig. 3.4).

i 番目の関節の各速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ は

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \dot{\theta}_{x0} \mathbf{e}_{x0} + \dot{\theta}_{y0} \mathbf{e}_{y0} + \dot{\theta}_{z0} \mathbf{e}_{z0} \quad (3.7)$$

$$\boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}_0 + \sum_{j=1}^i \dot{\theta}_j \mathbf{e}_j \quad (3.8)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_0 = \ddot{\theta}_{x0} \mathbf{e}_{x0} + \ddot{\theta}_{y0} \mathbf{e}_{y0} + \ddot{\theta}_{z0} \mathbf{e}_{z0} + \boldsymbol{\omega}_{x0} \times (\dot{\theta}_{y0} \mathbf{e}_{y0}) + \boldsymbol{\omega}_{y0} \times (\dot{\theta}_{z0} \mathbf{e}_{z0}) \quad (3.9)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 + \sum_{j=1}^i \{\ddot{\theta}_j \mathbf{e}_j + \boldsymbol{\omega}_{j-1} \times (\dot{\theta}_j \mathbf{e}_j)\} \quad (3.10)$$

と表される, ここで $\theta_{x0}, \theta_{y0}, \theta_{z0}$ は, 先頭リンクの姿勢, $\mathbf{e}_{x0}, \mathbf{e}_{y0}, \mathbf{e}_{z0} \in \mathfrak{R}^3$ は姿勢を表す仮想的な回転軸ベクトル, また $\boldsymbol{\omega}_{x0} = \dot{\theta}_{x0} \mathbf{e}_{x0} \in \mathfrak{R}^3$, $\boldsymbol{\omega}_{y0} = \boldsymbol{\omega}_{x0} + \dot{\theta}_{y0} \mathbf{e}_{y0}$ である,

各リンク重心の位置 $\mathbf{p}_{Gi} \in \mathfrak{R}^3$, 速度 $\dot{\mathbf{p}}_{Gi}$, 加速度 $\ddot{\mathbf{p}}_{Gi}$ は

$$\mathbf{p}_{Gi} = \mathbf{p}_i + \mathbf{l}_{Gi} \quad (3.11)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{Gi} = \dot{\mathbf{p}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{l}_{Gi} \quad (3.12)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_{Gi} = \ddot{\mathbf{p}}_i + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{l}_{Gi} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{l}_{Gi}) \quad (3.13)$$

となる,

各リンク摩擦作用点の位置 $\mathbf{p}_{fi} \in \mathfrak{R}^3$, 速度 $\dot{\mathbf{p}}_{fi}$, 加速度 $\ddot{\mathbf{p}}_{fi}$ は

$$\mathbf{p}_{fi} = \mathbf{p}_i + \mathbf{l}_{fi} \quad (3.14)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_{fi} = \dot{\mathbf{p}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{l}_{fi} \quad (3.15)$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_{fi} = \ddot{\mathbf{p}}_i + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{l}_{fi} + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{l}_{fi}) \quad (3.16)$$

となる,

3.4 斜面における動力学基本式

3.4.1 ニュートン・オイラーの方程式

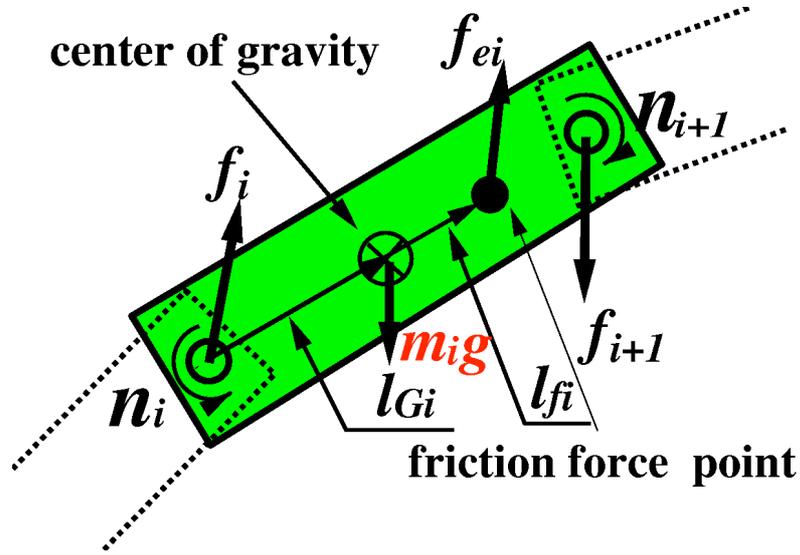


Fig. 3.5: Link model

i 番目のリンクに対する力の釣合, 関節回りのモーメントの釣合からニュートンの方程式, オイラーの方程式は

$$f_i - f_{i+1} + f_{ei} + m_i g = m_i \ddot{p}_{Gi} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} n_i - n_{i+1} - l_{Gi} \times f_i + (l_i - l_{Gi}) \times (-f_{i+1}) + \\ (l_{fi} - l_{Gi}) \times f_{ei} = I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_i \omega_i) \end{aligned} \quad (3.18)$$

と表される。ここで, $f_i \in \mathcal{R}^3$ は i 番目の関節に与えるべき力, $n_i \in \mathcal{R}^3$ は i 番目の関節に加えるべきモーメント, $f_{ei} \in \mathcal{R}^3$ はリンクの接地点に働く外力, m_i はリンク質量, $I_i \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ はリンクの慣性テンソル, $g = g[-\sin\psi, 0, -\cos\psi]^T$ は斜面における重力加速度ベクトル, ただし, 重心座標系での慣性テンソル I_i は基準姿勢での慣性テンソル \hat{I}_i を用いて $I_i = R_i \hat{I}_i R_i^T$ である。

3.4.2 モーメントの関係式

先頭姿勢の加速度 $\ddot{\theta}_0 = [\ddot{\theta}_{x0}, \ddot{\theta}_{y0}, \ddot{\theta}_{z0}] \in \mathcal{R}^3$, 先頭位置の加速度 $\ddot{p}_0 = [\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{z}_0] \in \mathcal{R}^3$, 関節角加速度 $\ddot{\theta} = [\ddot{\theta}_1, \dots, \ddot{\theta}_{n-1}] \in \mathcal{R}^{n-1}$, 関節に発生させるモーメント $N = [n_1^T, \dots, n_{n-1}^T]^T$, 3次元蛇ロボットの一般化座標 $q = [\theta_0^T, p_0^T, \theta^T]^T$ を用いて式 (3.18) から蛇ロボット全体のモーメントの関係式は以下のように求められる,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{n}_n \end{bmatrix} = \tilde{\mathbf{M}}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \tilde{\mathbf{M}}_0\ddot{\boldsymbol{\theta}}_0 + \tilde{\mathbf{M}}_a(\mathbf{g} - \dot{\boldsymbol{p}}_0) + \check{\mathbf{h}} + \check{\mathbf{K}}_e \mathbf{f}_e + \check{\mathbf{K}}_{n0} \mathbf{n}_0 + \check{\mathbf{K}}_{f0} \mathbf{f}_0 \quad (3.19)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{3n \times n-1}$$

$$\tilde{\mathbf{M}}_0(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{3n \times 3}$$

$$\tilde{\mathbf{M}}_a(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{3n \times 3}$$

$$\check{\mathbf{h}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathfrak{R}^{3n}$$

$$\check{\mathbf{K}}_e(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{3n \times 3n}$$

$$\check{\mathbf{K}}_{n0} \in \mathfrak{R}^{3n \times 3n}$$

$$\check{\mathbf{K}}_{f0}(\mathbf{q}) \in \mathfrak{R}^{3n \times 3n}$$

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \cdots & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{A}_{1,1}\mathbf{e}_1 & & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{2,1}\mathbf{e}_1 & \mathbf{A}_{2,2}\mathbf{e}_2 & \\ \vdots & & \ddots \\ \mathbf{A}_{n-1,1}\mathbf{e}_1 & \cdots & \mathbf{A}_{n-1,n-1}\mathbf{e}_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{0,0} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{n-1,0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{x0} & \mathbf{e}_{y0} & \mathbf{e}_{z0} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} m_{a0} \times \\ \vdots \\ m_{a,n-1} \times \end{bmatrix}, m_{ai} = -\sum_{j=0}^i \left\{ m_j \left(\sum_{k=j}^i \mathbf{l}_k - \mathbf{l}_{Gj} \right) \right\} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{h}}_i &= \sum_{j=1}^i \mathbf{A}_{i,j} (\boldsymbol{\omega}_{j-1} \times (\dot{\theta}_j \mathbf{e}_j)) \\ &+ \mathbf{A}_{i,0} (\boldsymbol{\omega}_{z0} \times (\dot{\theta}_{y0} \mathbf{e}_{y0}) + \boldsymbol{\omega}_{y0} \times (\dot{\theta}_{z0} \mathbf{e}_{z0})) \\ &+ \sum_{j=0}^i \left\{ \sum_{k=j+1}^i \left\{ m_k \left(\sum_{l=k}^i \mathbf{l}_l - \mathbf{l}_{G,k} \right) \right\} \times (\boldsymbol{\omega}_j \times (\boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{l}_j)) \right\} \\ &+ m_j \left(\sum_{k=j}^i \mathbf{l}_k - \mathbf{l}_{Gj} \right) \times (\boldsymbol{\omega}_j \times (\boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{l}_{Gj})) - \boldsymbol{\omega}_j \times (\mathbf{I}_j \boldsymbol{\omega}_j) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_e = \begin{bmatrix} [\tilde{\mathbf{k}}_{e00} \times] & & & \mathbf{0} \\ [\tilde{\mathbf{k}}_{e10} \times] & [\tilde{\mathbf{k}}_{e11} \times] & & \\ \vdots & & \ddots & \\ [\tilde{\mathbf{k}}_{en-1,0} \times] & \cdots & & [\tilde{\mathbf{k}}_{en-1,n-1} \times] \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$\tilde{\mathbf{k}}_{eij} = \sum_{k=j}^i \mathbf{l}_k - \mathbf{l}_{fj} \quad (3.25)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_{r0} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 \\ \vdots \\ \mathbf{E}_3 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}_{f0} = \left[-\sum_{j=0}^0 \mathbf{l}_j^T \quad -\sum_{j=0}^1 \mathbf{l}_j^T \quad \cdots \quad -\sum_{j=0}^{n-1} \mathbf{l}_j^T \right]^T \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{i,j} = & \sum_{k=j}^i \{ m_k ((\sum_{l=j}^{k-1} \mathbf{l}_l + \mathbf{l}_{Gk})^T (\sum_{l=k}^i \mathbf{l}_l - \mathbf{l}_{Gk}) \mathbf{E}_3 \\ & - (\sum_{l=j}^{k-1} \mathbf{l}_l + \mathbf{l}_{Gk}) (\sum_{l=k}^i \mathbf{l}_l - \mathbf{l}_{Gk})^T) - \mathbf{I}_k \} \in \Re^3 \times 3 \end{aligned} \quad (3.28)$$

ここで, \mathbf{E}_3 は 3 行 3 列の単位行列, $[\mathbf{a} \times]$ は

$$[\mathbf{a} \times] \equiv \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

と示される歪対称マトリクスであり, ベクトルの外積 $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = [\mathbf{a} \times] \mathbf{b}$ が成立する.

3.4.3 トルクの関係式

各関節 \mathbf{p}_i のアクチュエータ出力軸で発生すべきトルク τ_i とモーメント \mathbf{n}_i には

$$\tau_i = \mathbf{e}_i^T \mathbf{n}_i \quad (3.30)$$

の関係があることから式 (3.19) のモーメント \mathbf{N} を変換行列 $\mathbf{D} \in n \times 3n$ により各関節軸ベクトルに射影すると関節トルク $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_{n-1}]^T \in \Re^{n-1}$ は

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{n}_n \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} \mathbf{e}_1^T & & \mathbf{0} & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0} & \ddots & & \vdots \\ & & \mathbf{e}_{n-1}^T & \mathbf{0}_3^T \\ \hline \mathbf{0}_3 & \cdots & \mathbf{0}_3 & \mathbf{E}_3 \end{array} \right] \begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{n}_n \end{bmatrix} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{n}_n \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

と表される. これより関節トルク $\boldsymbol{\tau}$ は

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \boldsymbol{n}_n \end{bmatrix} &= \mathbf{D}(\tilde{\mathbf{M}}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \tilde{\mathbf{M}}_0\ddot{\boldsymbol{\theta}}_0 + \tilde{\mathbf{M}}_a(\mathbf{g} - \dot{\boldsymbol{p}}_0) + \tilde{\boldsymbol{h}} + \tilde{\mathbf{K}}_e\boldsymbol{f}_e + \tilde{\mathbf{K}}_{n0}\boldsymbol{n}_0 + \tilde{\mathbf{K}}_{f0}\boldsymbol{f}_0) \\ &= \mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{M}_0\ddot{\boldsymbol{\theta}}_0 + \mathbf{M}_a(\mathbf{g} - \dot{\boldsymbol{p}}_0) + \boldsymbol{h} + {}^\tau\mathbf{K}_e\boldsymbol{f}_e + \mathbf{K}_{n0}\boldsymbol{n}_0 + \mathbf{K}_{f0}\boldsymbol{f}_0 \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{q}) \in \mathfrak{R}^{(n+2) \times (n-1)}$$

$$\mathbf{M}_0(\boldsymbol{q}) \in \mathfrak{R}^{(n+2) \times 3}$$

$$\mathbf{M}_a(\boldsymbol{q}) \in \mathfrak{R}^{(n+2) \times 3}$$

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \in \mathfrak{R}^{n+2}$$

$${}^\tau\mathbf{K}_e(\boldsymbol{q}) \in \mathfrak{R}^{3n \times 3n}$$

3.4.4 力の関係式

ヘビロボット全体の力の釣り合いは式(3.17)から

$$\boldsymbol{f}_n = \mathbf{V}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{V}_0\ddot{\boldsymbol{\theta}}_0 + \mathbf{V}_a(\mathbf{g} - \dot{\boldsymbol{p}}_0) + \boldsymbol{u} + {}^f\mathbf{K}_e\boldsymbol{f}_e + \boldsymbol{f}_0 \quad (3.33)$$

と表される.

$$\mathbf{V}(\boldsymbol{q}) \in \mathfrak{R}^{3 \times (n-1)}$$

$$\mathbf{V}_0(\boldsymbol{q}) \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$$

$$\mathbf{V}_a(\boldsymbol{q}) \in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$$

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \in \mathfrak{R}^3$$

$${}^f\mathbf{K}_e(\boldsymbol{q}) \in \mathfrak{R}^{3 \times n}$$

$$\mathbf{V} = [\boldsymbol{a}_1 \times \boldsymbol{e}_1, \dots, \boldsymbol{a}_{n-1} \times \boldsymbol{e}_{n-1}] \quad (3.34)$$

$$\mathbf{V}_0 = [\boldsymbol{a}_0 \times \boldsymbol{e}_{x0}, \boldsymbol{a}_0 \times \boldsymbol{e}_{y0}, \boldsymbol{a}_0 \times \boldsymbol{e}_{z0}] \quad (3.35)$$

$$\mathbf{V}_a = \sum_{j=0}^{n-1} m_j \mathbf{E}_3 \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u} &= \sum_{j=1}^{n-1} \{\boldsymbol{a}_j \times (\boldsymbol{\omega}_{j-1} \times (\dot{\theta}_j b m \boldsymbol{e}_j))\} \\ &\quad + \boldsymbol{a}_0 \times (\boldsymbol{\omega}_{x0} \times (\dot{\theta}_{y0} \boldsymbol{e}_{y0}) + \boldsymbol{\omega}_{y0} \times (\dot{\theta}_{z0} b m \boldsymbol{e}_{z0})) \\ &\quad - \sum_{j=0}^{n-1} \{(\boldsymbol{\omega}_j \times (\boldsymbol{\omega}_j \times (\sum_{k=j+1}^{n-1} m_k \boldsymbol{l}_k + m_j \boldsymbol{l}_{Gj})))\} \end{aligned} \quad (3.37)$$

$${}^f\mathbf{K}_e = [\mathbf{E}_3, \dots, \mathbf{E}_3] \quad (3.38)$$

$$\boldsymbol{a}_j = \sum_{k=j}^{n-1} (\sum_{l=k+1}^{n-1} m_l \boldsymbol{l}_k + m_k \boldsymbol{l}_{Gk}) \in \mathfrak{R}^3 \quad (3.39)$$

3.4.5 動力学基本式

式(3.19),(3.33)を, 外力・外モーメントが働かないとして $\mathbf{f}_0, \mathbf{f}_n, \mathbf{n}_0, \mathbf{n}_n$ をゼロとしてまとめると関節角加速度 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$, 先端位置・姿勢の加速度 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_0, \dot{\boldsymbol{p}}_0$, 関節トルク $\boldsymbol{\tau}$ の関係は

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \mathbf{0}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{M}_0 & -\mathbf{M}_a \\ \mathbf{V} & \mathbf{V}_0 & -\mathbf{V}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_0 \\ \dot{\boldsymbol{p}}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_a \\ \mathbf{V}_a \end{bmatrix} \mathbf{g} + \begin{bmatrix} \mathbf{h} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \mathbf{K}_e \\ \mathbf{f} \mathbf{K}_e \end{bmatrix} \mathbf{f}_e \quad (3.40)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_\theta & \mathbf{M}_{\theta_0} & \mathbf{M}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_0 \\ \dot{\boldsymbol{p}}_0 \end{bmatrix} - \mathbf{M}_p \mathbf{g} + \mathbf{c} + \mathbf{K}_e \mathbf{f}_e \quad (3.41)$$

と表せる,

3.5 逆動力学

導出した動力学基本式(3.41)から, 任意の関節運動 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ を与えた場合それを実現するための関節トルクとそのときのヘビロボット先端の運動 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_0, \dot{\boldsymbol{p}}_0$ を導出する, ある外力 \mathbf{f}_e を指定するとトルク $\boldsymbol{\tau}$ と先端の運動 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}, \dot{\boldsymbol{p}}_0$ は

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_0 \\ \dot{\boldsymbol{p}}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{I.D.}} (\mathbf{M}_\theta \ddot{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{M}_p \mathbf{g} + \mathbf{c} + \mathbf{K}_e \mathbf{f}_e) \quad (3.42)$$

$$\mathbf{M}_{\text{I.D.}} = \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{E}_{n-1} & & \\ \hline \mathbf{0}_{6 \times n-1} & -\mathbf{M}_{\theta_0} & -\mathbf{M}_p \end{array} \right]^{-1} \quad (3.43)$$

と求まる, ここで $\mathbf{M}_{\text{I.D.}} \in \mathbb{R}^{n+5 \times n+5}$ である, これより, 蛇ロボットの関節トルク, 及び運動を導出することができる,

3.6 外力

蛇型ロボットは外部環境と点接触とすると, 外力 $\mathbf{f}_{ei} \in \mathbb{R}^3$ は垂直抗力 f_{Ni} と摩擦力 $\mathbf{f}_{fi} \in \mathbb{R}^3$ から

$$\mathbf{f}_{ei} = f_{Ni} \mathbf{b}_i + \mathbf{f}_{fi} \quad (3.44)$$

と表せる, ここで $\mathbf{b}_i \in \mathbb{R}^3$ は垂直抗力の単位方向ベクトルである, i リンクの接触点における摩擦力 \mathbf{f}_{fi} を接線方向 $\mathbf{t}_i \in \mathbb{R}^3$ と法線方向 $\mathbf{n}_i \in \mathbb{R}^3$ の摩擦力に分解すると

$$\mathbf{f}_{fi} = f_{fi}^t \mathbf{t}_i + f_{fi}^n \mathbf{n}_i \quad (3.45)$$

となる, ここで f_{fi}^t は接線方向摩擦力の大きさ, f_{fi}^n は法線方向摩擦力の大きさである,

3.7 まとめ

本章では, 蛇型ロボットの3次元斜面蛇行移動解析を可能にするため, 基本式を定式化した. 基本式から蛇型ロボットの運動及び関節トルクを導出することができる. よって, 3次元斜面蛇行移動解析が可能になる.

第4章 体形曲線及び外部環境の定式化

4.1 はじめに

斜面において生物の蛇は、尾の方のくねりを大きくするような不定形な体形曲線を用いている。そこで、蛇型ロボットの体形曲線を定式化する。また、蛇型ロボットは外部環境との相互作用により蛇行移動しているため、その環境のモデル化を行う。

4.2 体形曲線

蛇が移動しているときに描く体の形状を体形曲線と呼ぶ。蛇の体形曲線としては、今まで様々な提案がなされてきた。例えば、N.Rashevsky は三角波によって近似を行い [24]、J.Gray と Taylor らは正弦波曲線によって近似し [25]、地上と水中における蛇の運動について論じた。また、H.Hertel は、体型軌道を x 軸と y 軸方向の正弦波を合成した Meander と称する曲線で近似できるとした [26]、これらに対して、梅谷によってクロソイド曲線による体型軌道の近似がなされ [27]、さらに広瀬らによってサーペノイド曲線が提案された [1]、この二つの曲線の特徴は、直列索状の物体であることにより、脳より送られる指令値が単純な周期波となるように曲線長に沿った曲率を利用している点である。そこで、本研究では蛇型ロボットの体形曲線として、2次元水平面上でよく利用されているサーペノイド曲線を斜面蛇行移動に適用する。

4.2.1 定形な体形曲線

本研究では、くねりが一様な体形曲線を定形な体形曲線とする (Fig. 4.1)。サーペノイド曲線を用いて、体形曲線曲率は以下のような式で表す、

$$\kappa(s_p) = -\frac{2K_n\pi\alpha_0}{L} \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s_p\right) + K_1 \quad (4.1)$$

このサーペノイド曲線を蛇型ロボットに適用するため、曲線をリンク長で離散化しなければならない。そこで、体形曲線を等間隔に分けた点を通る接線を各リンクと近似するため以下の式のように定式化する。

$$\theta_i(s) \approx \int_{s+sp_{i-1}+\frac{1}{2}l}^{s+sp_i+\frac{1}{2}l} \kappa(u) du \quad (4.2)$$

$$\approx \int_{s+(i-1)l+\frac{1}{2}l}^{s+i+\frac{1}{2}l} k(u) du \quad (4.3)$$

$$\theta_i(s) = -2\alpha_0 \sin\left(\frac{K_n\pi}{n}\right) \sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) + K_1 l \quad (4.4)$$

$$\dot{\theta}_i(s) = -\frac{4K_n\pi}{L} \alpha_0 \sin\left(\frac{K_n\pi}{n}\right) \cos\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) \dot{s} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_i(s) = & -\frac{4K_n\pi}{L}\alpha_0\sin\left(\frac{K_n\pi}{n}\right)\cos\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right)\ddot{s} \\ & + \frac{8K_n^2\pi^2}{L^2}\alpha_0\sin\frac{K_n\pi}{n}\sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right)\dot{s}^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

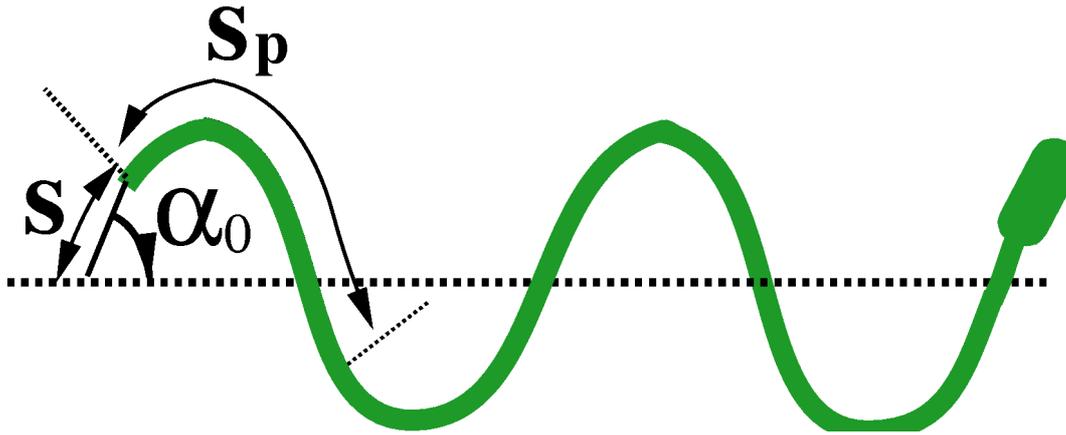


Fig. 4.1: Body curve(symmetrical)

4.2.2 不定形な体形曲線

斜面において生物の蛇は、尾の方のくねりを大きくするような不定形な体形曲線を用いているため、Fig. 4.2に示すような先頭のかねりを大きくしたり、逆に最後尾の方のかねり大きくできるようにする。そこで、初期かねり角 α_0 を関節ごとに変化できるようにし、その割合を係数 k の大ききで定義し、定式化したものを以下に示す。

$$\theta_i(s) = -2\alpha(i)\sin\left(\frac{K_n\pi}{n}\right)\sin\left(\frac{2K_n\pi}{L}s + \frac{2K_n\pi}{n}i\right) + K_1l \quad (4.7)$$

$$\alpha(i) = \frac{\pi}{180}ki + \alpha_0 \quad (4.8)$$

また、Fig. 4.3に示すように係数 k の値を変えることで様々な体形をとれることがわかる。 k をプラスにすると先頭の方のかねりを大きくすることができ、逆にマイナスにすると最高尾の方のかねりを大きくすることができる。

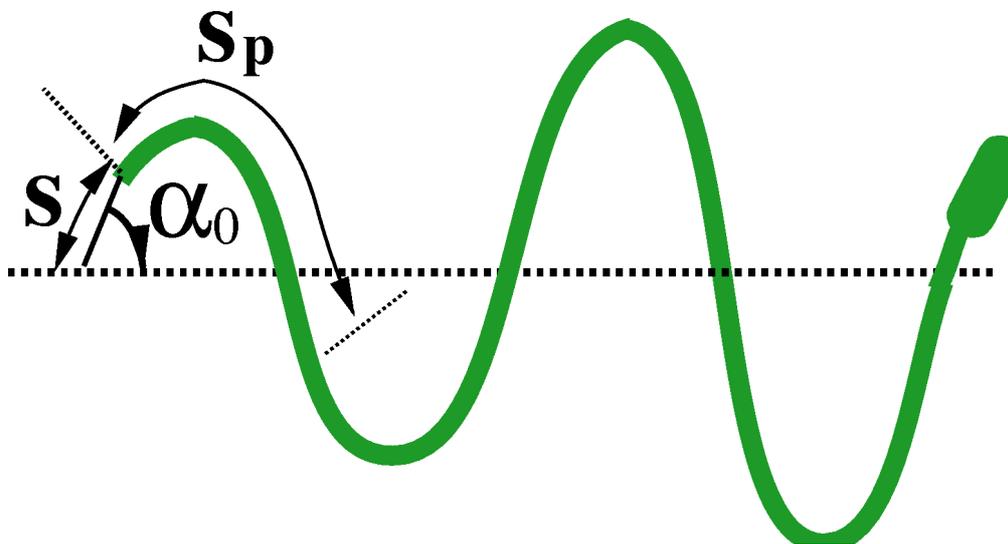
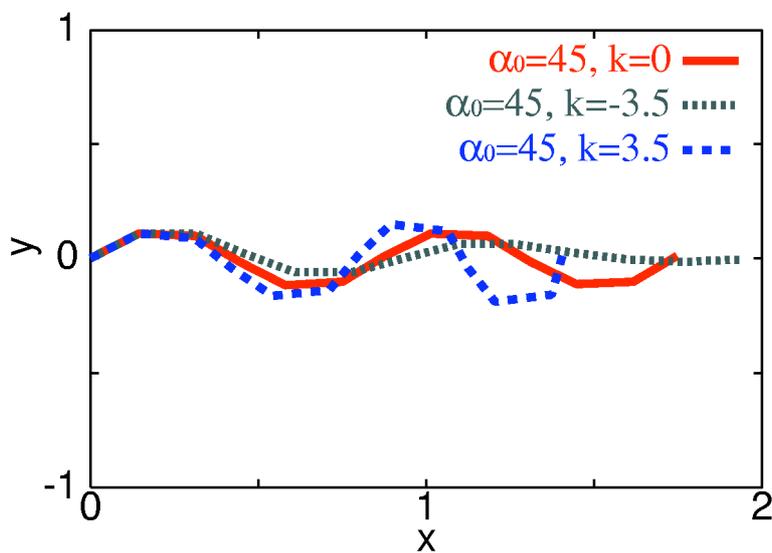


Fig. 4.2: Body curve(unsymmetrical)

Fig. 4.3: Unsymmetrical curves determined by the unsymmetrical factor k and the initial value of the winding angle α_0

4.3 クーロン摩擦力

蛇型ロボットは, 地面との摩擦を利用して, 蛇行移動するためクーロン摩擦を用いて, 摩擦力をモデル化する. 接線方向, 法線方向の速度 v_i^t, v_i^n を用いてクーロン摩擦力は,

$$f_{fi}^\gamma = \begin{cases} -\frac{v_i^\gamma}{V_\gamma} \mu_{\gamma S} f_{Ni} & |v_i^\gamma| < V_\gamma \text{ static friction force} \\ -\text{sign}(v_i^\gamma) \mu_{\gamma D} f_{Ni} & |v_i^\gamma| \geq V_\gamma \text{ dynamic friction force} \end{cases} \quad (\gamma = t, n)$$

のように表すことができる (Fig. 4.4, Fig. 4.5), ここで, μ_{tS}, μ_{nD} は接線方向静摩擦係数・動摩擦係数, μ_{nS}, μ_{tD} は法線方向静摩擦係数・動摩擦係数, V_γ は静摩擦をモデル化するための静摩擦と動摩擦の境界速度である. また, 接線方向, 法線方向の速度は

$$v_i^t = \mathbf{t}_i^T \mathbf{P}_{fi} \quad (4.9)$$

$$v_i^n = \mathbf{n}_i^T \mathbf{P}_{fi} \quad (4.10)$$

である.

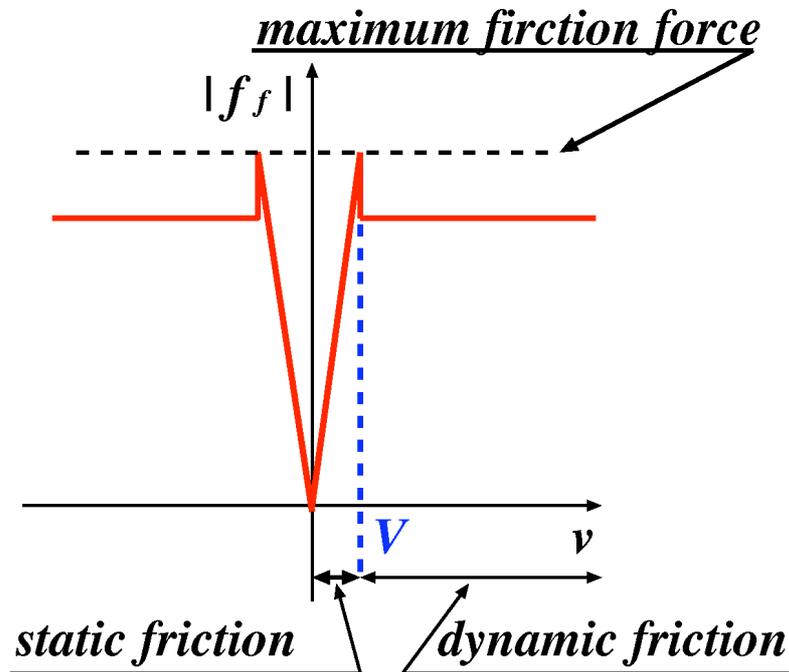


Fig. 4.4: Coulomb friction

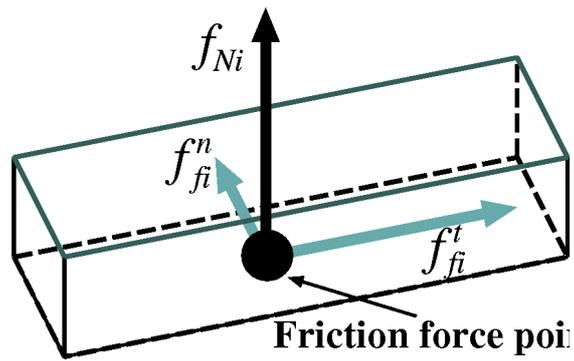


Fig. 4.5: Friction model

4.4 まとめ

本章では、蛇型ロボットの体形曲線をサーペノイド曲線を用いて定式化し、生物が斜面を移動する体形をうまく近似できるようにした、また、地面との摩擦をクーロン摩擦によりモデル化し、外部環境を定式化した。

第5章 斜面における3次元蛇型ロボットの運動解析

5.1 はじめに

3節で導出した動力学基本式を基にして3次元蛇型ロボットの動力学解析を行う。この場合、蛇型ロボットの全リンクが2次元平面と常に接触しているという拘束を与える。この場合でも、斜面を登る際に生じるモーメントの影響を考慮することができる。本研究では、3次元蛇型ロボットの運動を地面からの抗力の分配により解析する。そこで、2次元 sinus-lifting 運動と定抗力運動を数理計画法に基づいて定式化する。

5.2 動力学解析

抗力と外力、蛇ロボットの動力学との関係を定式化する。外力と抗力の関係は、式(3.44),(3.45),(4.9)より

$$\mathbf{f}_{ei} = f_{Ni} \hat{\mathbf{f}}_{ei} \quad (5.1)$$

と表せる。よって

$$\mathbf{f}_e = \hat{\mathbf{F}}_e \mathbf{f}_N \quad (5.2)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_e = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{f}}_{e0} & & & \mathbf{0} \\ & \hat{\mathbf{f}}_{e1} & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \hat{\mathbf{f}}_{e,n-1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3n \times n} \quad (5.3)$$

となる。ここで、 $\mathbf{f}_N = [f_{N0}, \dots, f_{N,n-1}]^T \in \mathbb{R}^n$ である。これより、抗力を指定すれば外力は一意に求まる。

式(3.42)より蛇ロボットの動力学基本式と抗力の関係は

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}}_0 \\ \dot{\mathbf{p}}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_\tau \\ \mathbf{A}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}} \\ \mathbf{A}_{\dot{\mathbf{p}}_0} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{F}}_e \mathbf{f}_N + \begin{bmatrix} \mathbf{b}_\tau \\ \mathbf{b}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}} \\ \mathbf{b}_{\dot{\mathbf{p}}_0} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

となる。ここで、 $\mathbf{A}_{\tau(q)} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times 3n}$, $\mathbf{A}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}(q)} \in \mathbb{R}^{3 \times 3n}$, $\mathbf{A}_{\dot{\mathbf{p}}_0(q)} \in \mathbb{R}^{3 \times 3n}$ がそれぞれ蛇ロボットの関節トルク $\boldsymbol{\tau}$, 先頭位置の姿勢 $\boldsymbol{\theta}_0$, 先頭位置の加速度 $\dot{\mathbf{p}}_0$ と外力 \mathbf{f}_e の関係を表す行列であり、 $\mathbf{b}_{\tau(q, \dot{q}, \ddot{q})} \in \mathbb{R}^{n-1}$, $\mathbf{b}_{\dot{\boldsymbol{\theta}}(q, \dot{q}, \ddot{q})} \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{b}_{\dot{\mathbf{p}}_0(q, \dot{q}, \ddot{q})} \in \mathbb{R}^3$ がそれぞれ、位置・速度、角加速度で決まる外力 \mathbf{f}_e によらない項である。

5.3 2次元平面の拘束条件

蛇型ロボットは、2次元平面で運動するため、Z 軸方向の並進運動、X, Y 軸回りの回転運動と3つの拘束が必要である。

Z 軸並進の拘束条件

$$\mathbf{k}^T \left(\sum_{i=0}^{n-1} \mathbf{f}_{ei} + \sum_{i=0}^{n-1} m_i \mathbf{g} \right) = 0 \quad (5.5)$$

X, Y 軸周り回転の拘束条件

$$\mathbf{i}^T \left(\sum_{i=0}^{n-1} (\mathbf{p}_{fi} - \mathbf{p}_0) \times \mathbf{f}_{ei} + \sum_{i=0}^{n-1} (\mathbf{p}_{Gi} - \mathbf{p}_0) \times m_i \mathbf{g} \right) = 0 \quad (5.6)$$

$$\mathbf{j}^T \left(\sum_{i=0}^{n-1} (\mathbf{p}_{fi} - \mathbf{p}_0) \times \mathbf{f}_{ei} + \sum_{i=0}^{n-1} (\mathbf{p}_{Gi} - \mathbf{p}_0) \times m_i \mathbf{g} \right) = 0 \quad (5.7)$$

となる. ここで $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} \in \mathfrak{R}^3$ はそれぞれ X, Y, Z 軸の単位ベクトルである. 以上の拘束条件式を行列の形式にすると

$$\mathbf{A}_{2D} \mathbf{f}_N = \mathbf{b}_{2D} \quad (5.8)$$

$$\mathbf{A}_{2D} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}^T((\mathbf{p}_{f0} - \mathbf{p}_0) \times \hat{\mathbf{f}}_{e0}) & , \dots , & \mathbf{i}^T((\mathbf{p}_{f,n-1} - \mathbf{p}_0) \times \hat{\mathbf{f}}_{e,n-1}) \\ \mathbf{j}^T((\mathbf{p}_{f0} - \mathbf{p}_0) \times \hat{\mathbf{f}}_{e0}) & , \dots , & \mathbf{j}^T((\mathbf{p}_{f,n-1} - \mathbf{p}_0) \times \hat{\mathbf{f}}_{e,n-1}) \\ 1 & , \dots , & 1 \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{3 \times n} \quad (5.9)$$

$$\mathbf{B}_{2D} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\mathbf{i}^T \left(\sum_{i=0}^{n-1} (\mathbf{p}_{Gi} - \mathbf{p}_0) \times m_i \mathbf{g} \right) \\ -\mathbf{j}^T \left(\sum_{i=0}^{n-1} (\mathbf{p}_{Gi} - \mathbf{p}_0) \times m_i \mathbf{g} \right) \\ -\mathbf{k}^T \sum_{i=0}^{n-1} m_i \mathbf{g} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^3 \quad (5.10)$$

である, これより抗力 \mathbf{f}_N は上記の 3つの条件を満たして入れば自由に与えることができる.

5.4 抗力一様分布

関節角加速度入力を一定として, 蛇の定常の運動をモデル化する. また, 蛇の定常の運動は加重が一様に分布されているものとする. 抗力には $n-3$ の自由度があるため, この自乗和最小を解とする. これは, 余分なトルクを必要としないため定常な

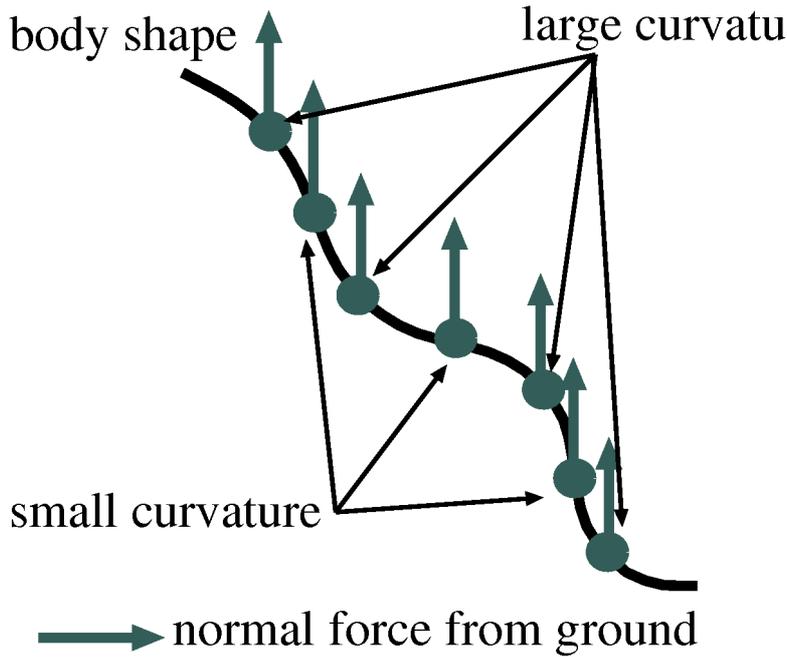


Fig. 5.1: Steady motion

運動に適していると考えられる。また、抗力には非負の条件があり、また2次元の拘束条件式から、抗力一様分布の抗力導出は2次計画問題に帰着される。

$$\max \quad \mathbf{f}_N^T \mathbf{Q} \mathbf{f}_N, \mathbf{Q} = \text{diag}\{1, \dots, 1\} \quad (5.11)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{A}_{2D} \mathbf{f}_N = \mathbf{b}_{2D} \quad (5.12)$$

$$\tau_{\min} \leq \mathbf{A}_\tau \tilde{\mathbf{F}}_e \mathbf{f}_N + \mathbf{b}_\tau \leq \tau_{\max} \quad (5.13)$$

$$\mathbf{f}_N \geq 0 \quad (5.14)$$

5.5 sinus-lifting 運動

sinus-lifting 運動とは、生物の蛇が高速移動時に観測される運動であり、Fig. 5.3 に示すように滑走体形の曲げのピーク部分をそり上げ、滑走面より浮き上げていることがわかる。このようにすることで、法線力によってもっとも滑べりを生じやすい体形形状曲線の曲率がゼロとなる部分に体重を集中することで横滑べりを少なくすることができる。この sinus-lifting 運動を用いることで素早い運動が可能となり斜面などの滑べり易い環境においては、有効であると考えられる。

sinus-lifting に関する従来の研究は、その体幹形状をを実現するための関節角度入力を導出するもの [28]、2次元平面上で蛇型ロボット全体の可操作性を向上させ、体重分配を大域最適値探索で誘導するもの [29] があるが、移動速度についての議論は十分にされていない。



Fig. 5.2: Sinus-lifting motion

本研究では,2次元平面において sinus-lifting 運動を抗力の分配によりモデル化を行う,そこで,2次元 sinus-lifting 運動を抗力の重み付けに体形曲線曲率関数を用いてモデル化する,よって,2次元 sinus-lifting 運動は以下のような2次計画問題に帰着することができる.

$$\max \quad \mathbf{f}_N^T \mathbf{Q} \mathbf{f}_N, \mathbf{Q} = \text{diag}\{\kappa(s_0)^2, \kappa(s_1)^2, \dots, \kappa(s_{n-1})^2\} \quad (5.15)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{A}_{2D} \mathbf{f}_N = \mathbf{b}_{2D} \quad (5.16)$$

$$\tau_{min} \leq \mathbf{A}_\tau \mathbf{F}_e \mathbf{f}_N + \mathbf{b}_\tau \leq \tau_{max} \quad (5.17)$$

$$\mathbf{f}_N \geq 0 \quad (5.18)$$

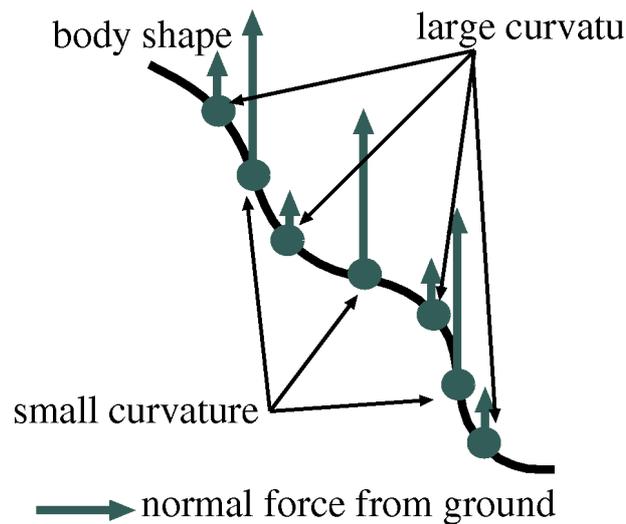


Fig. 5.3: 2D sinus-lifting

5.6 まとめ

蛇型ロボットの運動を2次元平面に拘束して行うための定式化を行い、3次元蛇型ロボットの運動を地面からの抗力の分配により解析するため2次元sinus-lifting運動と定抗力運動を数理計画法に基づいて定式化した。ここで導出した式を用いることで斜面において3次元蛇型ロボットの運動解析が可能になる。

第6章 シミュレーション及び実機 実験

6.1 はじめに

前章までに導出した基本式を基に2次元と3次元の斜面蛇行移動解析シミュレータを開発し,これらを用いて蛇型ロボットの最適蛇行形態を導出する.まず,2次元斜面蛇行移動解析シミュレーション及び実機実験によって生物の蛇が用いる後尾部のくねりを大きくするような不定形体形曲線の有効性を検証する.

3次元の斜面蛇行移動解析シミュレータを用いて最適蛇行曲線の導出をし,2次元シミュレータ及び実機実験との比較をし,その有効性を検証する.また,蛇型ロボットの関節の自由度の組み合わせを変え,それによってロボットの運動にどのような影響を及ぼすかを検証する.

6.2 2次元斜面蛇行移動解析シミュレーション

6.2.1 シミュレーション条件

斜面における蛇型ロボットの動力学解析手法を用いて2次元斜面蛇行移動解析シミュレータを開発した.入力は,実機のパラメータと外部環境のパラメータ及び体型曲線のパラメータであり,出力は斜面蛇行移動に必要な関節トルク,蛇型ロボット末端の加速度,角加速度となる.ここで,本シミュレータにおいては,ロボット末端部分の位置及び角度をオイラー数値積分を用いて導出し,運動解析を可能にしている.実験条件として実機パラメータを用いて体軸方向速度 $s = 0.2$,S形状数 $K_n = 2$ とし,斜面において速度が最大になる体形曲線を最適な体形として導出する.くねり角の最適値は,一つの傾斜の斜面においてくねり角を $0[\text{deg}]$ から $180[\text{deg}]$ までの間で斜面滑走速度が最大となるようくねり角を黄金分割法を用いて導出している.今回は摩擦係数として,斜面を構成する木板と蛇型移動ロボットの受動車輪との摩擦力を計測し,摩擦係数を与えた.

Table 6.1: Parameter of Snake-like robot

n	Number of links	12
m	Link mass[kg]	1.62
I	Moment inertia of links[kgm ²]	0.03656
l	Link length [m]	0.17
l_G	Distance from i -th joint to the CG of i -th link[m]	0.065
l_f	Distance from i -th joint to the friction point of i -th link[m]	0.030
μ_t	Friction coefficients in tangential direction	0.01176
μ_n	Friction coefficients in normal direction	0.5294

6.2.2 定形な体形曲線と不定形な体形曲線の比較

斜面において,生物の蛇は後尾部のくねりを大きくするような不定形な体形を用いることが多い.そこで,蛇型ロボットに与える入力として定形な体形曲線と不定形な体形曲線を与え,有効性を検証する.また,不定形な体形曲線の場合では,先頭の方のくねりを大きくした場合や逆に尻尾の方のくねり大きく場合,またどれだけ先頭のくねりを大きくするかという割合も考慮にいれて最適蛇行曲線の導出をする.

定形な体形曲線

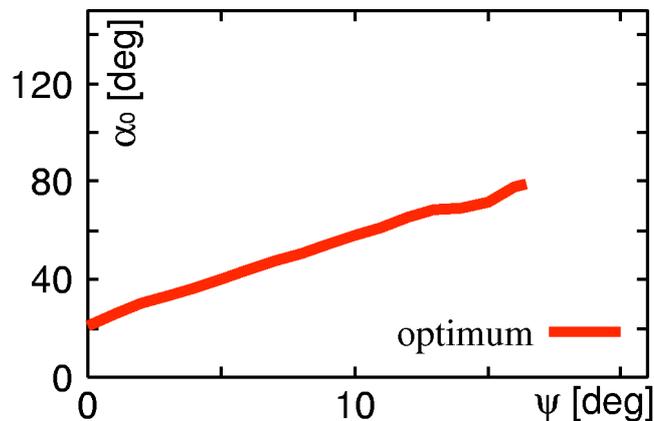


Fig. 6.1: Optimal α_0 and ψ (symmetric)
 v [m/s]

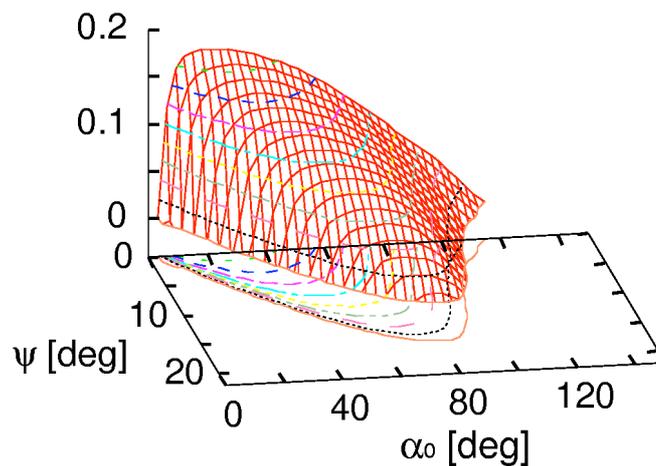


Fig. 6.2: v w.r.t. α_0 and ψ (symmetric)

定形な体形曲線を用いた場合の斜面滑走速度 v ,最適な α_0 と傾斜角 ψ の関係をFig. 6.1, Fig. 6.2に示す.定形な体形曲線の場合には, α_0 を変化させることで蛇型ロボットの斜面適応滑走ができ,最適体形曲線は傾斜が上がるにつれて α_0 も大きく

なっている。しかし、傾斜に応じてくねり角を大きくし過ぎても運動効率は悪く、傾斜角に依存した結果になっていることがわかる。これは、特に傾斜角が低い場合には、少なくねり角で登れるにもかかわらず、くねり角を大きくしすぎてしまうと無駄にくねってしまい効率が悪くなるためである。また、傾斜角が大きくなると蛇型ロボットのくねりを大きくしないと、斜面からすべり落ちてしまう。そのため、くねりが大きい結果になっている。これらのことから、本シミュレータを用いることで斜面の滑べりを考慮でき、傾斜に応じて最適蛇行曲線が導出できることがわかる。

実際にシミュレータを使って、定形な最適体形曲線を用いて傾斜角 10[deg] の斜面蛇行移動している様子を Fig. 6.3 に示す。傾斜角が 10[deg] であるため、くねり角が 25[deg] 以下であると斜面を登ることができないが、最適なくねり角を入力として入れていることにより、うまく斜面を効率よく登れている。これらの結果から定形な体形曲線を用いた場合で、うまく斜面蛇行移動できていることがわかる。

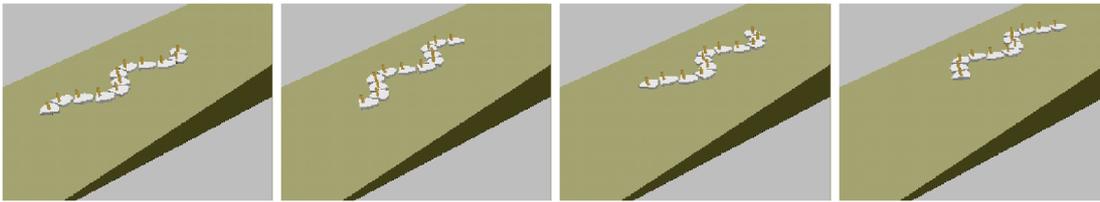
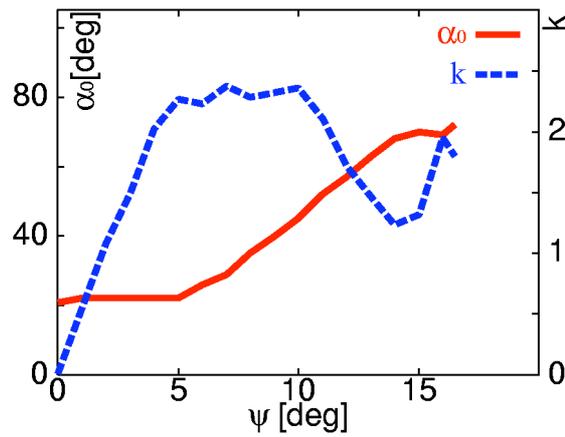
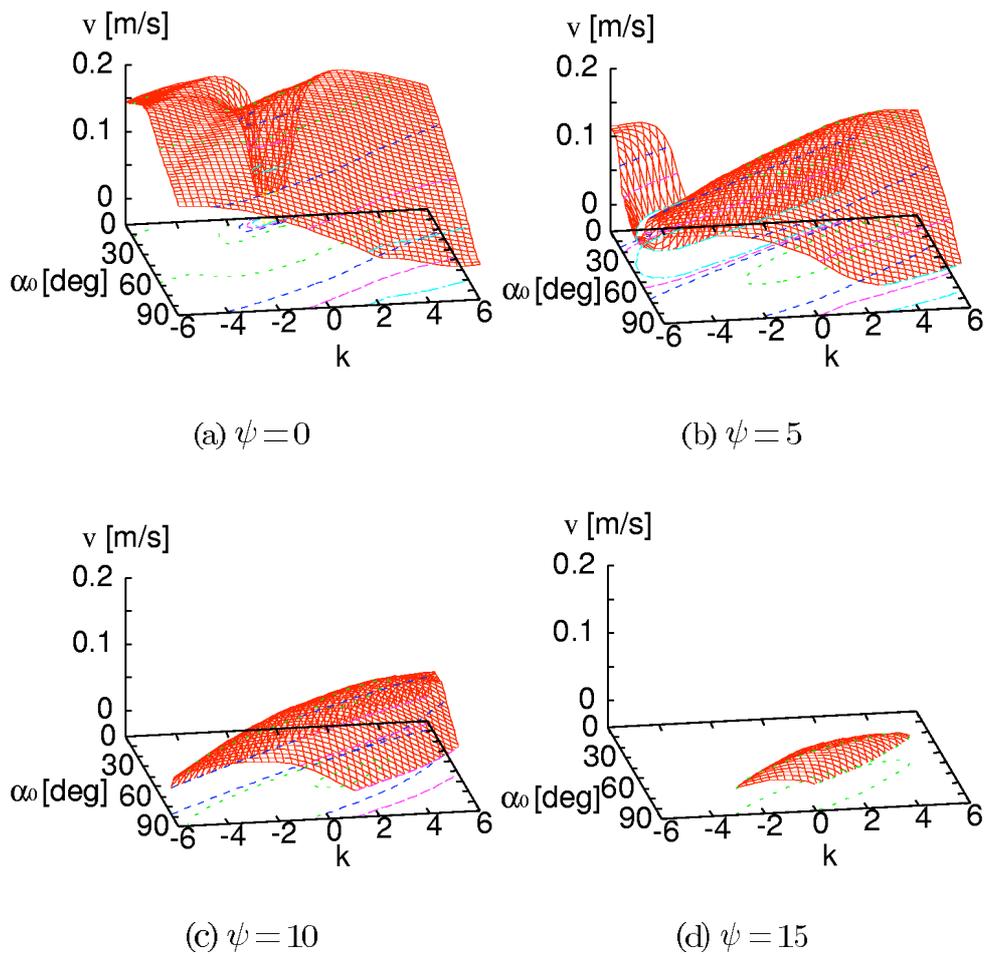


Fig. 6.3: Simulation to show creeping locomotion on a 10[deg] slope (Symmetric case)

不定形な体形曲線

不定形な体形曲線の場合の傾斜角 ψ に対する斜面滑走速度 v 、最適な α_0 及び係数 k の関係を Fig. 6.4, Fig. 6.5 に示す。不定形な体形曲線の場合には、最初 α_0 と k の値は傾斜が上がるごとに増加している、しかし傾斜が 10[deg] から 15[deg] までの場合は、 k の値は減少している。このように傾斜ごとに α_0 と k を変えることで最適な体形曲線の導出ができる。このように傾斜に応じて k の大きさが変動するものの、ゼロの値となっていないことから、斜面において不定形な体形曲線が有効であることがわかる。これは、斜面上では蛇型ロボットの重心が後ろにくるため不定形な体形曲線が有効になる。そのため、傾斜角がゼロの場合(平面)では、 k の大きさはゼロとなっており、不定形な体形曲線は有効でない結果が得られている。なお、係数 k の大きさがマイナスにならず全ての傾斜においてプラスの値を取っていることから、斜面において、蛇型ロボットの場合では、生物の蛇とは逆に先頭の方のくねりを大きくした体形が有効であることがわかる。

Fig. 6.6 に示す定形な体形曲線と不定形な体形曲線における蛇型ロボットの斜面滑走速度の比較から、斜面蛇行移動において、定形な体形曲線よりも不定形な体形曲線を用いた方が斜面滑走速度が向上することがわかる。しかし、傾斜角が低い場

Fig. 6.4: Optimal α_0 and optimal k due to ψ (unsymmetric)Fig. 6.5: v w.r.t. α_0 and k in case of the unsymmetrical body shape

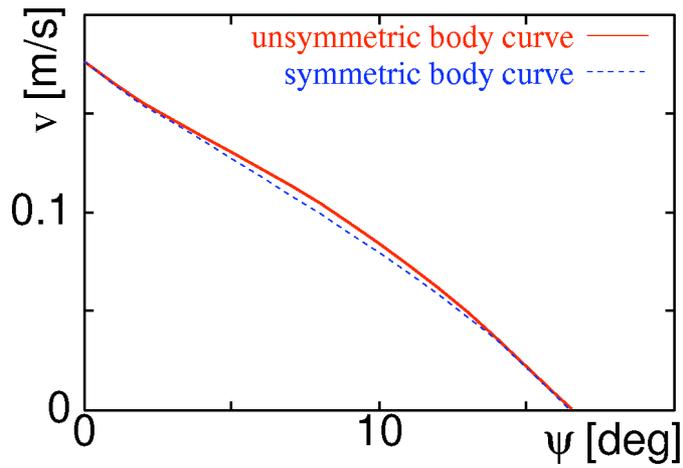
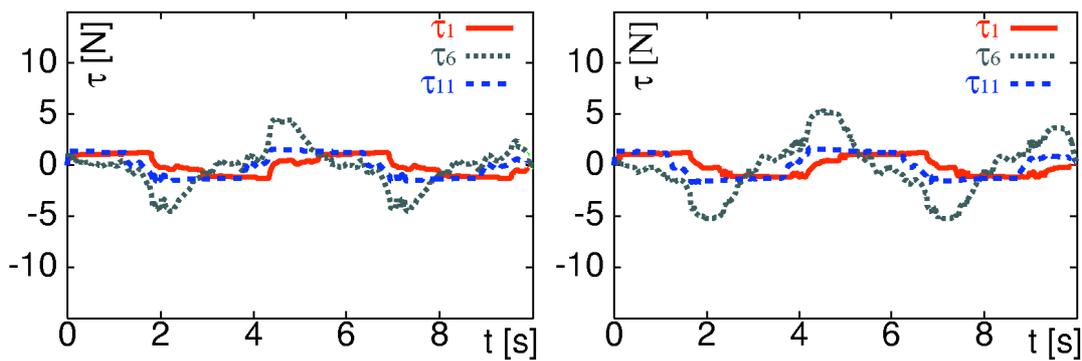


Fig. 6.6: Comparison of the velocity between the symmetrical body shape and the unsymmetrical body shape



(a) Symmetrical shape

(b) Unsymmetrical shape

Fig. 6.7: Joint torques while the snake-like robot creep on the 10[deg] slope in the optimal body shape

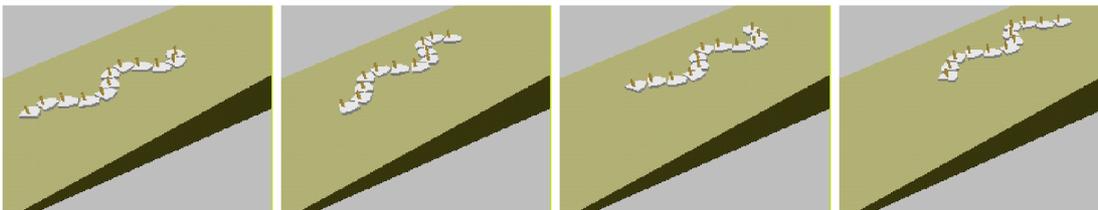


Fig. 6.8: Simulation to show creeping locomotion on a 10[deg] slope (Unsymmetric case)

合には、定形な体形曲線と不定形な体形曲線を比較しても少し不定形な体形曲線がよいがほとんど差がない。これは、傾斜が低い場合には、重力の影響が小さいためである。また、傾斜角がロボットが斜面を登れる限界の角度に近づくと不定形な体形曲線と定形な体形曲線の差が小さくなっている。これは、限界に近付くとほとんど斜面を登ってはいなく、距離が非常に短いためである。そして、Fig. 6.7に示す傾斜10[deg]の場合のトルクの比較から不定形な体形曲線の場合でも定形な場合に比べてそれほど大きくなっていく、無駄にトルクを消費していないことがわかる。

傾斜角10[deg]の斜面を不定形体形曲線を用いて登っている様子をFig. 6.8に示す。この図からも、先頭のくねりを大きくした体形が有効であることがわかる。よって、蛇型ロボットの斜面蛇行移動において、不定形体形曲線の方が有効であることを立証したと言える。

6.3 実機実験

計算機シミュレーション実験の結果から、蛇型ロボットの場合では、生物の蛇とは逆に先頭の方のくねりを大きくする体形が斜面において有効であることが言えた。その有効性を検証するために実機実験を行った。

6.3.1 実機の機構

実験には本研究室で開発した、1自由度を有する蛇型ロボットを用いた。主な特徴を示すと

- Fig. 6.9(a)に示すように体形曲線を等間隔に分けた点を通る接線を各リンクと近似し、車輪はリンクに設置し常にリンクの方向を向くようになっているため関節角度のみを制御すればよい。
- Fig. 6.9(b)のように歯車は関節角度用の一枚だけでよく、一つのアクチュエータがギアを介して前方のリンクを動かすという構造になっている。
- 従来開発された蛇型ロボットに比べ構造が簡単であり、環境適応性を持たせるためのセンサなどを容易に搭載でき、高い拡張性を有する。

である。

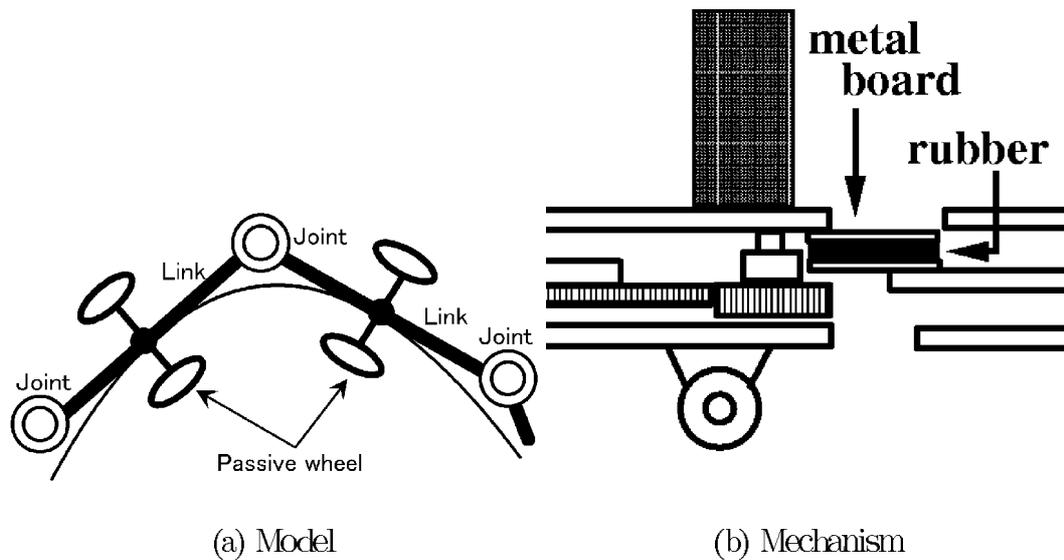


Fig. 6.9: 1DOF snake-like robot

6.3.2 実験結果

実機実験では、傾斜角が $0[\text{deg}]$, $5[\text{deg}]$, $10[\text{deg}]$ の場合のみ行い、定形な体形曲線と不定形な体形曲線の斜面滑走速度の比較を Fig. 6.10, Fig. 6.11, Fig. 6.12 に示す。実機実験においても同様に不定形な体形曲線の方が斜面滑走速度が大きく斜面蛇行移動に適していることが確認できる。 k の大きさは、傾斜角に応じて変化していることがわかる。しかし、傾斜角がゼロの場合、シミュレーションでは k の大きさはゼロであったが実機では、ゼロではなく先頭の方のくねりを大きくした方がよい結果になった。これは、シミュレーションが2次元モデルであるため、リンクの厚みや転倒モーメントを考慮できないためであると考えられる。また、実機実験の場合、最適なくねり角は、シミュレーションと比べると全ての傾斜の場合で大きくなっていることがわかる。これは、実機の機構的な制約のためであり、実験の傾向としては、同じような結果が得られているといえる。よって、実機実験からも不定形な体形曲線が斜面において有効であることがいえる。

蛇型ロボットが傾斜角 $10[\text{deg}]$ の斜面を登る動作例を Fig. 6.13, Fig. 6.14 に示す。定形な体形曲線を用いた場合でもうまく斜面を登ることができていることがわかる。また、不定形な体形曲線を用いた場合では、先頭の方のくねりを少し大きくして斜面蛇行移動をしていることがわかる。

よって、シミュレーション及び実機実験から蛇型ロボットの場合では、生物の蛇とは逆に先頭の方のくねりを大きくする体形が斜面において有効であることを立証できた。

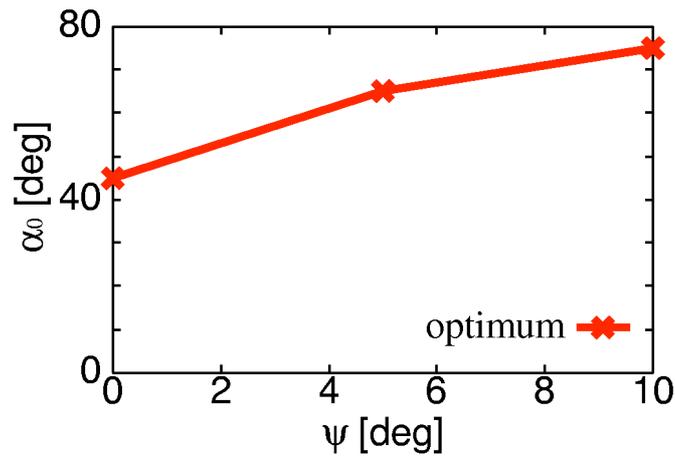


Fig. 6.10: Optimal α_0 and ψ (symmetric)

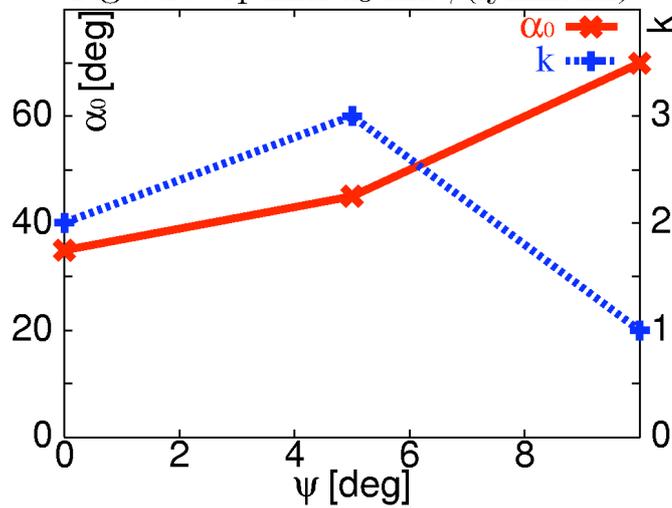


Fig. 6.11: Optimal α_0 and optimal k due to ψ (symmetric)

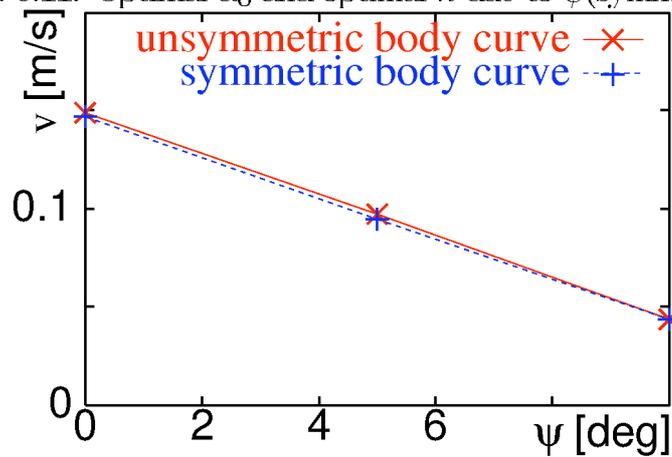


Fig. 6.12: Experimental results



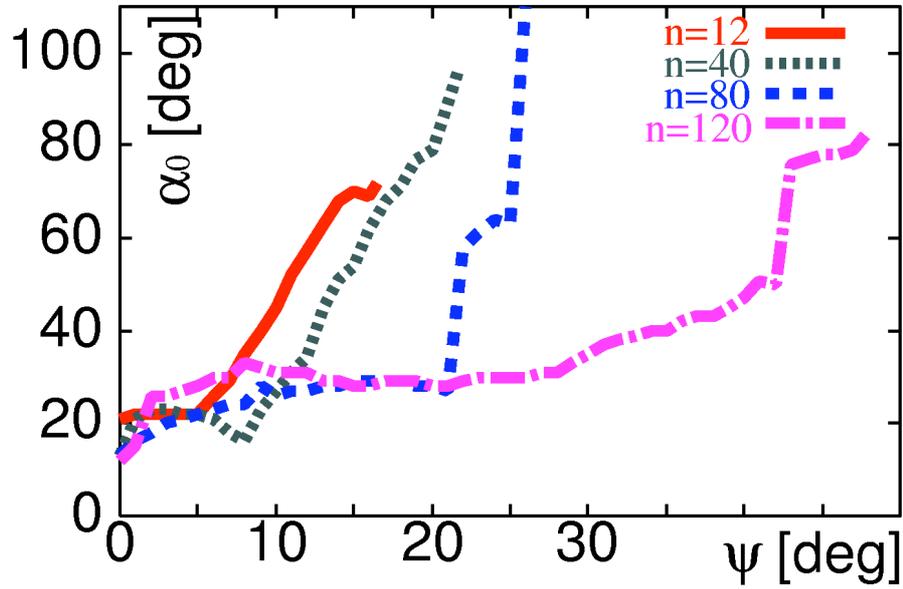
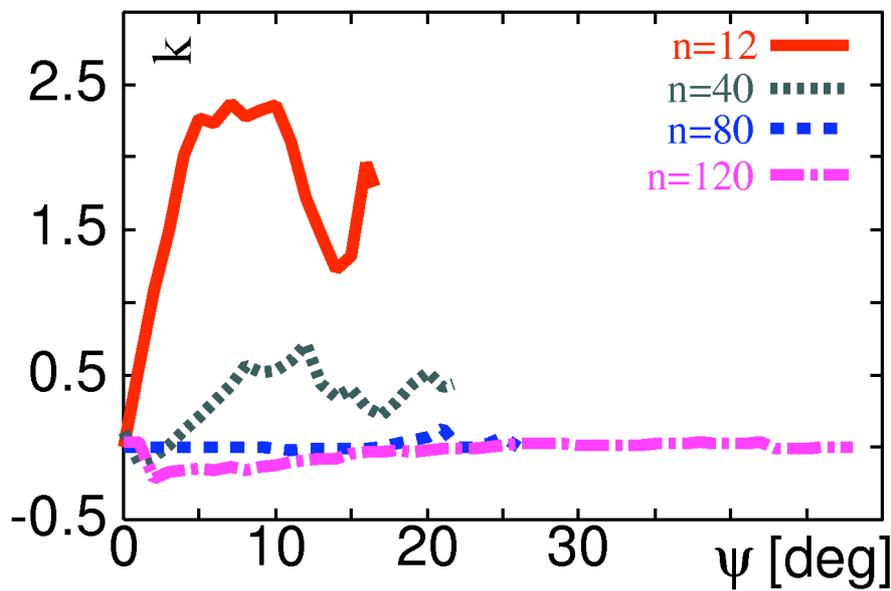
Fig. 6.13: Experiment to show creeping locomotion on a 10[deg] slope (Symmetric case)

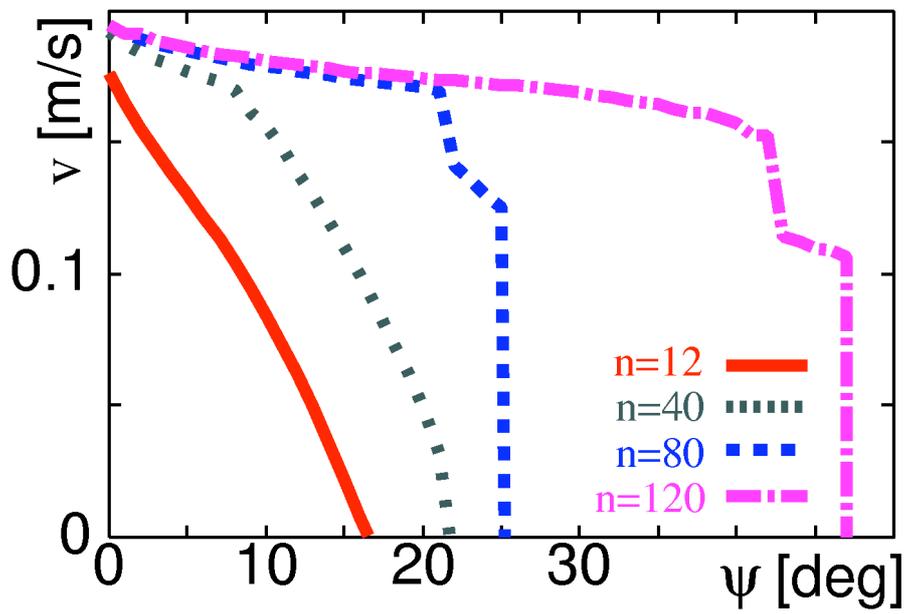
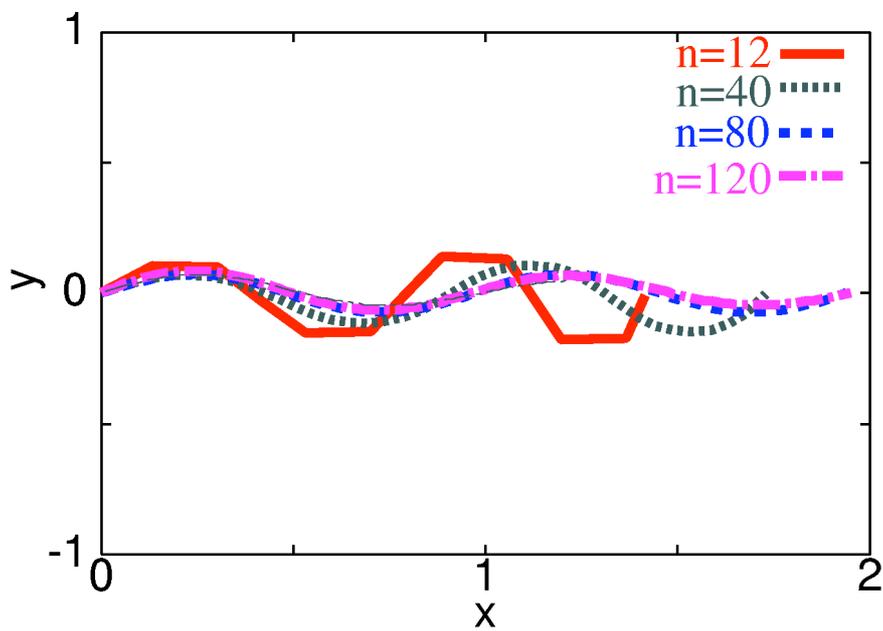


Fig. 6.14: Experiment to show creeping locomotion on a 10[deg] slope (Unsymmetric case)

6.3.3 リンク数増加の影響

計算機シミュレーション及び実機実験から12リンクを有する1自由度蛇型ロボットのモデルでは,先頭部のくねりを大きくした方が斜面滑走速度が向上する結果になっている.しかし,生物の蛇は後ろの方のくねりを大きくしている.そこで,モデルを生物の蛇に近づけるためにリンク数を増加し,この効果について計算機シミュレーションを用いて検討する.リンク数の増加に対するスケーリングを行うため,リンク数を変化させても蛇型ロボットの全長,全重量は変化しない.リンク数を増加させた場合の最適体形曲線の変化及び斜面滑走速度の変化を Fig. 6.15 に示す.結果より,リンク数を増やすことによってリンクの離散化誤差が少なくなり,より滑らかな移動ができるため斜面滑走速度を向上できることが分かる.リンク数が80以上になると微小ではあるものの k の大きさがマイナスになっており,生物の蛇と同様に後ろの方のくねりを大きくした体形曲線が最適になっている.しかし,値が小さく力学モデルが2次元のものであるため,生物の蛇と同様の結果が得られたとは言いがたい.斜面では,転倒モーメントの影響が大きく働くため,その影響を2次元モデルでは,考慮できないためリンクモデルを3次元に拡張し,3次元的に解析し,最適蛇行曲線の導出を行う必要がある.

(a) α_0 wrt. ψ (b) k wrt. ψ

(c) v w.r.t. ψ 

(d) body shape

Fig. 6.15: Influence to body shape change due to the link number

6.4 3次元斜面蛇行移動解析シミュレーション

6.4.1 シミュレーション及び実機実験の比較

実験条件

蛇型ロボットが斜面を蛇行移動する際には, yaw 軸だけでなく, roll 軸, pitch 軸の転倒モーメントの影響を受けている, そのため蛇型ロボットの運動解析をする場合には, 3次元モデルを使う必要がある. そこで, 3次元斜面蛇行移動解析シミュレータを開発した (Fig. 6.16). 入力は2次元シミュレータ同様, 実機のパラメータと外部環境のパラメータ及び体型曲線のパラメータであり, 出力は斜面蛇行移動に必要な関節トルク, 蛇型ロボット先頭の加速度, 角加速度となる. また, 地面からの抗力分配により定抗力運動及び2次元 sinus-lifting 運動ができるようになっている. 関節の自由度も任意に変えることもでき3次元蛇型ロボットとしての解析が可能である,

実機の1自由度蛇型ロボットの関節の pitch 軸が受動的なことを考慮し, リンクモデルを yaw 軸, pitch 軸を持たせた2自由度モデルとしてシミュレーションを行い, 2次元シミュレータと実機実験との比較をする. また, 1自由度蛇ロボットとの運動比較をするため, 蛇型ロボットの抗力分布が一様な場合において解析を行う. そして, 蛇型ロボットのモデルは, pitch, yaw の回転軸をもつユニットを交互に連結するものとする. 蛇型ロボットが基準姿勢のときの回転軸ベクトル \hat{e}_i は

$$\hat{e}_i = \begin{cases} \mathbf{j} & i: \text{even} \\ \mathbf{k} & i: \text{odd} \end{cases} \quad (6.1)$$

とする. また, リンクモデルは直方体 ($0.17 \times 0.16 \times 0.034$) とする.

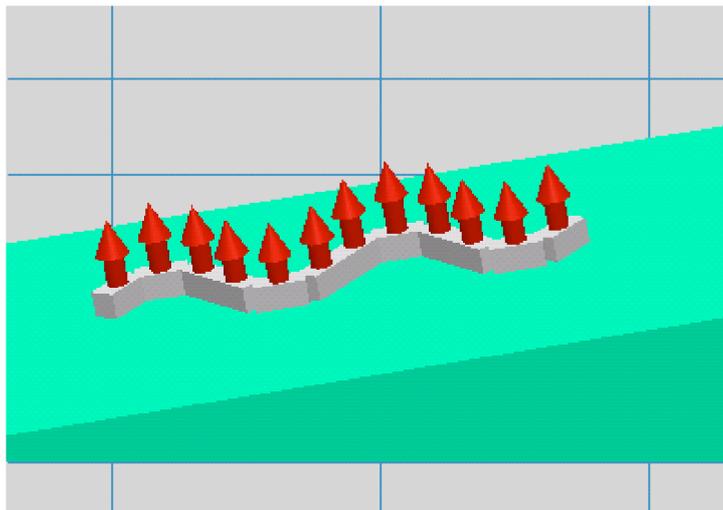


Fig. 6.16: 3D Snake robot simulator

実験結果

3次元モデルシミュレーションと2次元モデルシミュレーション及び実機実験の比較を Fig. 6.17 に示す。3次元モデルを用いて斜面蛇行移動解析をした結果から最適なくねり角の大きさは2次元モデルを用いた場合とほぼ同じだが、斜面滑走速度に関しては小さくなっていることがわかる。これは、転倒モーメントの影響をうまく考慮できているためである。斜面であることと、実機の蛇型ロボットは、リンクの摩擦作用点の位置と重心の位置がずれているため、pitch 軸で発生する転倒モーメントの影響は大きいものと考えられる。このため、2次元モデルと比べて3次元モデルの方が斜面滑走速度が落ちている。

実機実験との比較では、3次元モデルを用いた解析の方が斜面滑走速度が小さくなっていることがわかる。3次元モデルのシミュレーションの場合では、地面との接触は点接触と仮定しており、実機のリンクには二つの受動車輪が取り付けられている。そのため、実機の場合では、二つ受動車輪があることで転倒モーメントの影響を軽減することができ、3次元シミュレーションの場合の方が大きく転倒モーメントの影響を受けてしまっている。3次元モデルを使ったシミュレーションの結果から、傾斜が高くなるにつれて、実機実験と3次元モデルシミュレーションとの差が大きくなっており、転倒モーメントが大きくなるにつれて誤差が大きくなっていることがわかる。

3次元モデルを用いて傾斜10[deg]の斜面蛇行移動をさせた場合の地面からの抗力及び関節トルクの結果を Fig. 6.18, Fig. 6.19, Fig. 6.20 に示す。この結果から抗力は、転倒モーメントの影響から先頭の方の抗力が大きくなっていることがわかる。斜面上では、重力の影響から先頭の方のpitch 軸回りのモーメントが大きくなり、蛇型ロボットを2次元平面に拘束するために抗力が大きくなっている。関節トルクは、yaw 軸回りのトルクに比べてpitch 軸回りのトルクが小さい。yaw 軸トルクは関節を振るために使っており、pitch 軸トルクは地面を押しつけるために使っている。今回の場合では、定抗力運動を行っているためpitch 軸では、余分なトルクを発生しないため、yaw 軸と比べて小さくなっている。また、yaw 軸トルクは、両端のリンクと比べて真ん中の方のリンクの方が大きいことがわかる。蛇型ロボットは、両端が固定されていないため、トルクが真ん中の方に集中している。蛇型ロボットが傾斜5[deg]の斜面を移動している様子を Fig. 6.21 に示す。うまく斜面を登れていることがわかる。

シミュレーション及び実機実験結果から斜面において蛇型ロボットの運動を解析する際には、3次元モデルを用いることで転倒モーメントの影響も考慮することができ、厳密な解析が可能であることを確認した。

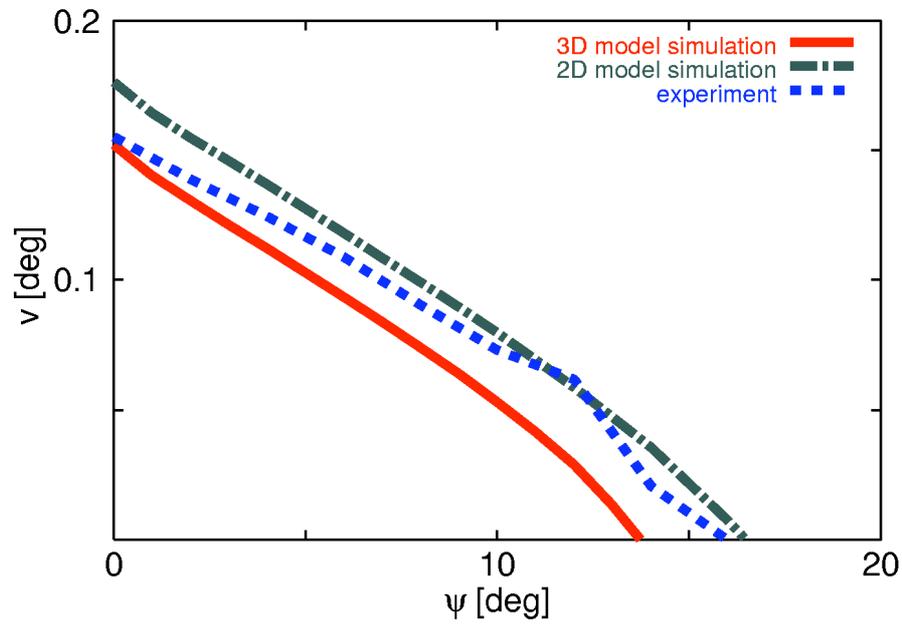
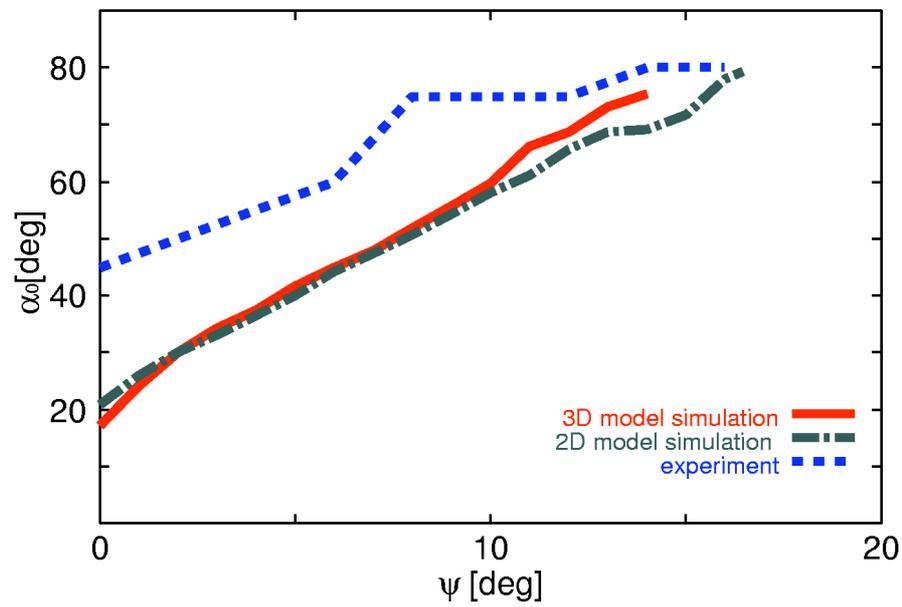
(a) v w.r.t. ψ (b) optimal α_0 and ψ

Fig. 6.17: Comparison of simulation and experiments

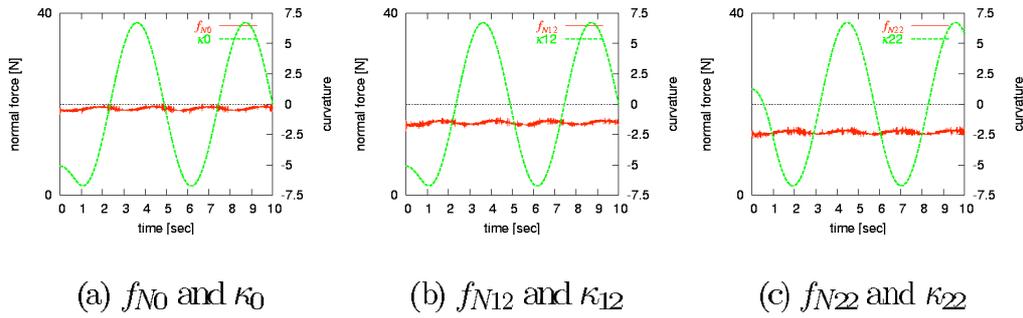


Fig. 6.18: Normal force and curvature(10[deg] slope)

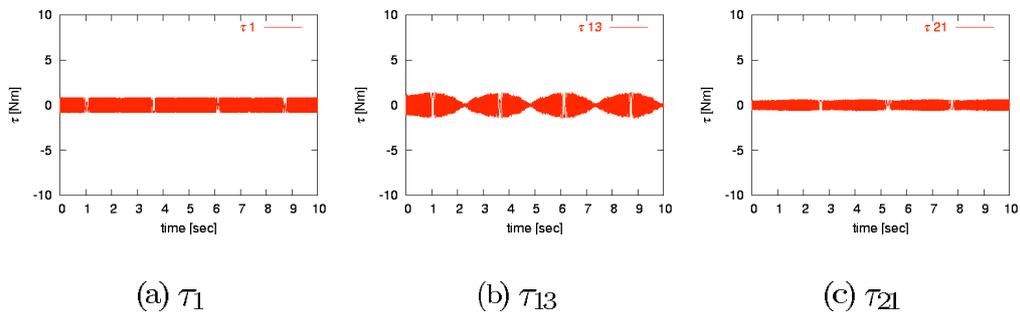


Fig. 6.19: Pitch torques(10[deg] slope)

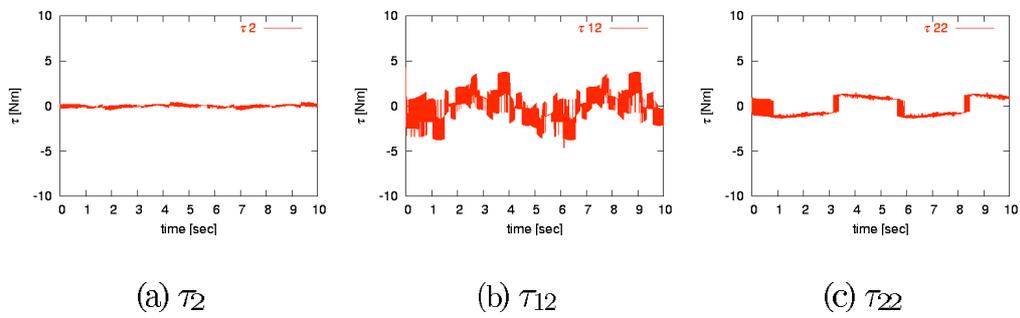


Fig. 6.20: Yaw torques(10[deg] slope)

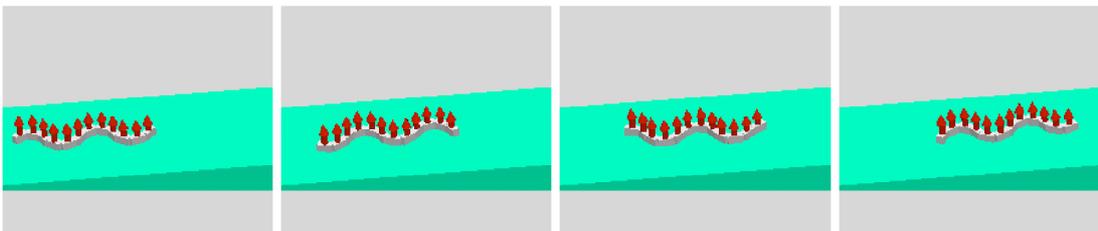


Fig. 6.21: Steady motion (10[deg] slope)

6.4.2 関節の自由度の変化による影響

3次元蛇型ロボットの関節の自由度の組み合わせによって、ロボットの運動にどのような影響を及ぼすかを検証する。この解析により蛇型ロボットを設計する際に関節の自由度をどのように組み合わせるかを定めることができる。なお、定抗力運動と sinus-lifting 運動の場合で運動解析を関節の自由度を変えた場合の有効性を検証する。

実験条件

実験パラメータとして、本研究室で開発している roll 回転型 2 自由度蛇型ロボットのパラメータを用いて解析を行う。以下にパラメータを示す。

Table 6.2: Simulation parameter(2DOF snake-like robot)

Shape of a unit	Rectangular solid
Link length [m]	0.158×0.07
Number of unit n	10
Mass of unit m [kg]	0.5
Distance from i -th joint to the CG of i -th link[m]	0.079
Distance from i -th joint to the friction point of i -th link[m]	0.136
Friction coefficients in tangential direction	0.01176
Friction coefficients in normal direction	0.5294
Limit of torque τ [Nm]	± 20.0

定抗力運動

定抗力運動で関節の組み合わせを変えて斜面蛇行移動させた場合の結果を Fig. 6.22 に示す。この結果から、2 自由度モデルで、関節で yaw 軸と pitch 軸を組み合わせた場合と yaw 軸と roll 軸を組み合わせた場合を比較すると、地面を押しつけるために roll 軸を用いるより、pitch 軸を用いた方が微小ではあるが少ないくねり角で斜面を登れている。しかし最適なくねり角、最適斜面滑走速度共にほぼ同じような結果である。これは、定抗力運動の場合では余分なトルクを必要としないためである。roll 軸、pitch 軸どちらを用いても地面を押しつけるトルクを発生することができ、定抗力運動の場合では、ほとんど差がない。

傾斜角 5[deg] の場合で関節トルク及び抗力を付録 A に示す。関節の自由度を 3 自由度にした場合には、yaw 軸で蛇行形態をとるために必要なトルクを発生し、pitch 軸と roll 軸の両方のトルクを使って地面を押しつけることになる。この場合では、定抗力運動であることから最適なくねり角、最適斜面滑走速度共に関節が 2 自由度の場合とほとんど変わらない。pitch 軸と roll 軸の両方のトルクを使って地面を押し

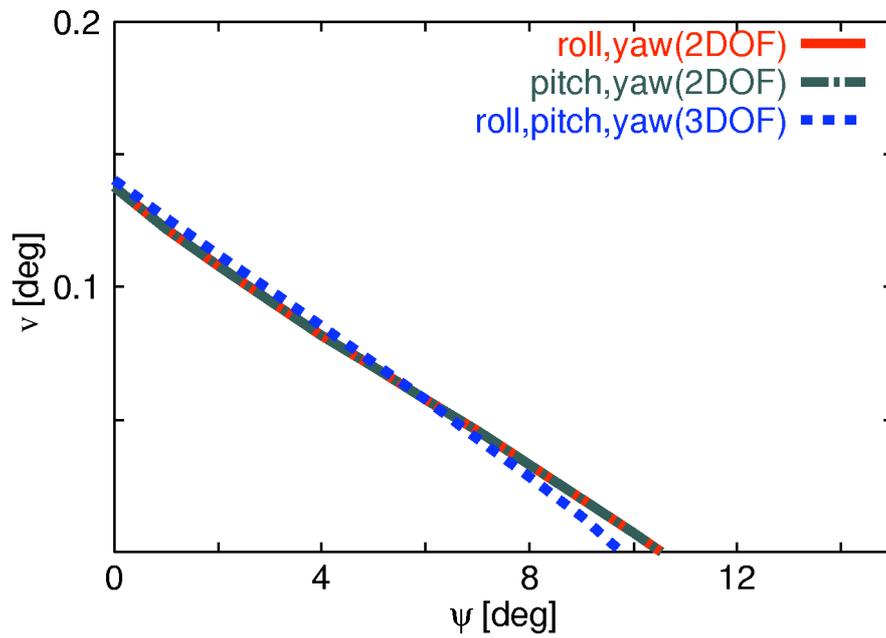
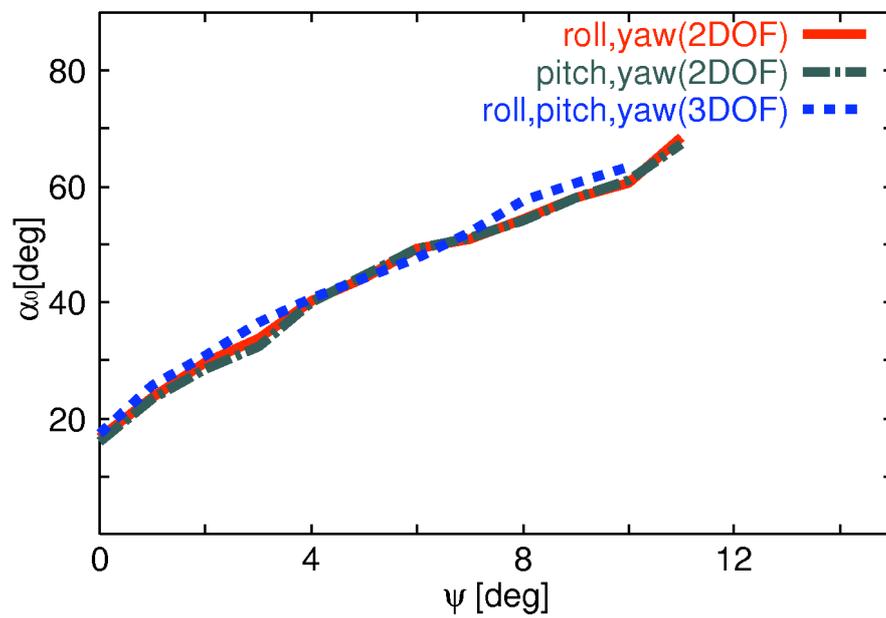
(a) v w.r.t. ψ (b) Optimal α_0 and ψ

Fig. 6.22: Influence of the change of the joint DOF(steady motion)

つけるため、トルクを分散できるため、2自由度の場合と比べてトルクが少し小さくなっている。

このことから、定抗力運動の場合では、関節の自由度は2自由度あれば十分であり、組み合わせを変えたり、自由度を増やしても、運動には、ほとんど影響がでないことが明らかになった。

2次元 sinus-lifting 運動

生物の蛇が行うような sinus-lifting 運動を抗力分配により、2次元運動で実現する、斜面などの滑りやすい環境においては、sinus-lifting 運動を用いることで、滑りを少なくすることができ、運動性能の向上が期待できる。このような2次元 sinus-lifting 運動を関節の組み合わせを変えて斜面で行った場合の結果を Fig. 6.23 に示す。この結果より、関節2自由度の場合、yaw 軸と pitch 軸の組み合わせと yaw 軸と roll 軸の組み合わせを比較するとロボットの最適くねり角は roll 軸を用いた方が微小ではあるが小さい。しかし、最適斜面滑走速度及びくねり角は、ほとんど違いがないことがわかる。これは、ロボットが地面を押しつけるトルクを roll 軸で出すか pitch 軸で出すかの違いだけであるためである。また、定抗力運動と比べて大きい斜面滑走速度が得られていることがわかる。抗力分配により、体形曲率がゼロ付近に抗力を集中することで滑りを少なくし、滑りやすい傾斜の大きい斜面においてもうまく登れていることがわかる。傾斜角 5[deg] の場合で関節トルク及び抗力を付録A に示す。定抗力運動と比べてトルクが2自由度の場合で roll 軸、pitch 軸が大きくなっている。これは、抗力を体形曲率がゼロ付近に集中しているためであり、その部分でトルクが大きくなっている。これらのことから関節が2自由度の場合では、2次元 sinus-lifting 運動を用いることで、滑りを少なくすることができ傾斜の急な斜面であってうまく登ることができることを確認した。

また、関節を3自由度にした場合、2自由度にした場合と比べると、傾斜が低く滑りにくい面では、斜面滑走速度が大きい。傾斜角が 7[deg] 以上になると逆に3自由度の場合の方が斜面滑走速度が小さくなっていることがわかる。最適くねり角も2自由度にした場合と比べると大きくなっていることがわかる。これは、3自由度にしたことによりすべての自由度にモーメントの影響が加わってしまうためであり抗力を出すことができず、関節トルクも小さくなっている。よって、傾斜が低い場合では、関節の自由度は3自由度の方がよいが、傾斜がある程度大きい場合には2自由度の方が有効であることがわかる。

これらのことから、関節の自由度は、滑りにくい環境では、3自由度が有効であり、滑りやすい環境では2自由度の方が有効であるというように環境に応じて最適な自由度が変わることがわかった。

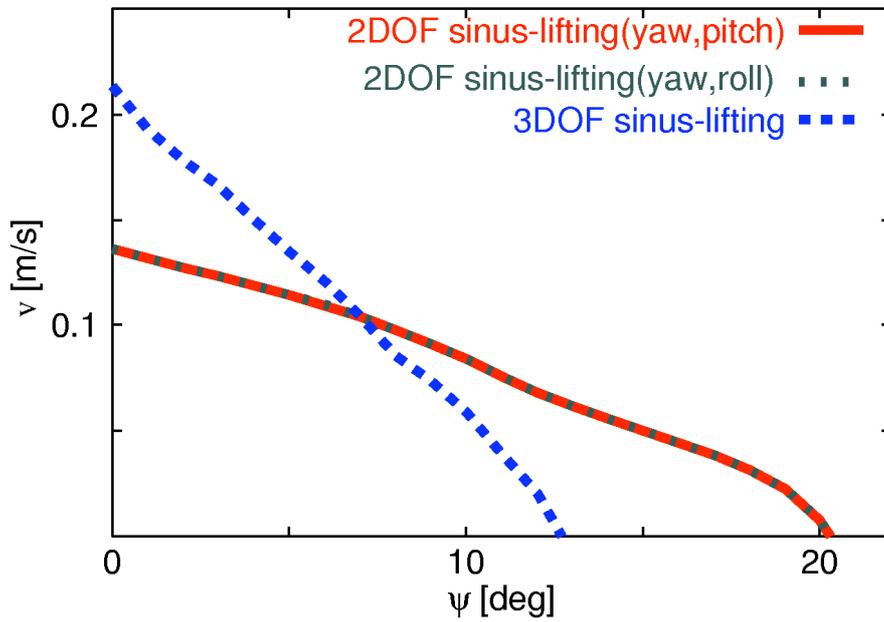
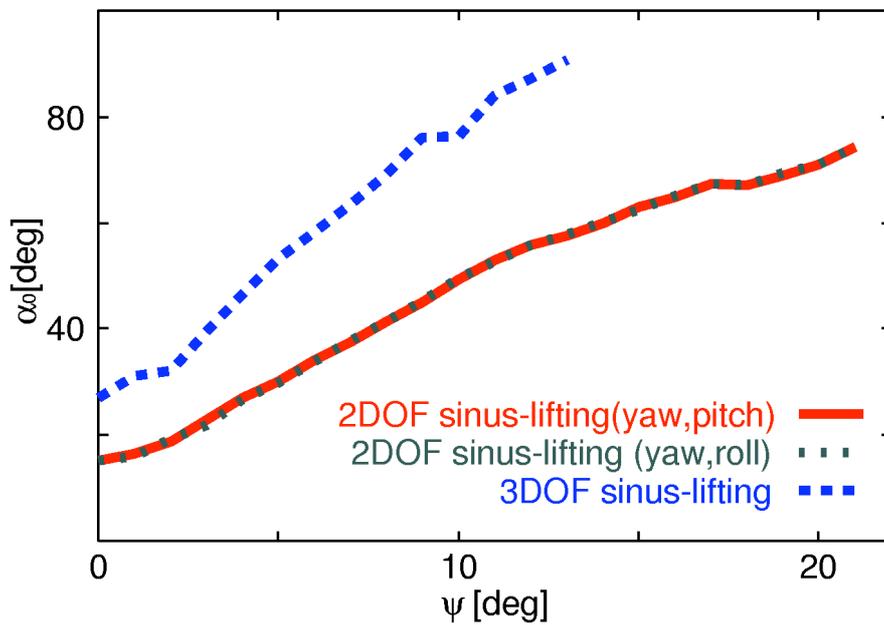
(a) v w.r.t. ψ (b) Optimal α_0 and ψ

Fig. 6.23: Influence of the change of the joint DOF(sinus-lifting)

6.5 まとめ

2次元と3次元の蛇型ロボットの斜面蛇行移動解析シミュレータを開発し、これらを用いて蛇型ロボットの最適蛇行形態を導出した。その結果、2次元シミュレーションから斜面において、蛇型ロボットの場合では、生物の蛇とは逆に先頭のくねりを大きくした体形が有効であることを示した。

また、3次元シミュレーションから転倒モーメントを考慮した解析ができ、厳密な蛇型ロボットの斜面蛇行移動解析ができることを示した。さらに、3次元蛇型ロボットの関節の自由度の組み合わせを変えることで、斜面に適した自由度の数についても導出した。

第7章 結論と今後の課題

7.1 結論

本論文では、斜面における蛇型ロボットの2次元と3次元斜面蛇行移動解析シミュレータを開発し、計算機シミュレーション及び実機実験によって最適蛇行移動形態を導出した、

2次元斜面蛇行移動解析 斜面において生物の蛇が尻尾の方のくねりを大きくするような不定形な体形曲線を用いているため、2次元的に蛇型ロボットの運動解析を行い、定形な体形曲線と不定形な体形曲線を比較し有効性を検証した。そして、蛇型ロボットの場合では、生物の蛇とは逆に、先頭の方のくねりを大きくするような体形が有効であることを計算機シミュレーション及び実機実験により示した、

3次元斜面蛇行移動解析 蛇型ロボットが斜面蛇行移動する際には、滑りだけでなく、転倒モーメントも生じているため、3次元的に解析をすることで、より厳密な解析が可能である。そこで、3次元斜面蛇行移動解析を行い、2次元的な解析と実機実験との比較をし、3次元斜面蛇行移動解析では、転倒モーメントの影響も考慮できるため、2次元的な解析に比べて、より実機実験に近い結果が得られ、厳密な解析が可能であること確認した、

また、関節の自由度の組み合わせについての検証も行った。この結果、定抗力運動の場合では、関節の自由度が多くても運動効率は変わらないことが明らかになり、2次元sinus-lifting運動の場合では、3自由度にした場合には、傾斜が低い場合には、2自由度の場合よりも斜面滑走速度が大きいが、斜面の傾斜が高くなると、すべての自由度にかかるモーメントが大きくなるため、抗力をうまく分配することができなくなってしまい、2自由度の場合の方がよいことがわかった、

7.2 今後の課題と展望

本論文では、斜面において蛇型ロボットの運動解析を行ったが、生物の蛇が軟弱な地盤や凹凸の激しい荒れ地などでの移動が可能であり、蛇型ロボットの高い環境適応能力を活かすためには、そのような環境での運動解析が必要である。この場合、環境のモデル化として軟弱な地盤や凹凸の激しい環境をどのように表現するかなど問題が多く定式化は困難である。また、斜面において蛇型ロボットの3次元モデルで解析を2次元平面に拘束して行ったが、首をもたげるような3次元的な動作の解析も必要である。この場合、地面との衝突のモデル化やリンクを持ち上げた場合の安定性を考慮に入れなければならない。さらにリンクを何個もたげても蛇行移動が可能かということについても考えなければならない。その評価基準を定義しなければならない。このように、運動解析についての研究はまだ不十分であり多くのテーマが考えられる、

本論文では、蛇ロボットの先頭位置・姿勢の制御については行っていないが、蛇

型ロボットを任意の位置に動かすためには制御が必要である。蛇型ロボットは、外部環境との相互作用により移動することから、動力学を考慮した制御をしなければならない。そのため、蛇型ロボットが体軸法線方向に横滑べりをしないという仮定で制御することはできず従来の手法は適用できない。このように、制御についても研究は不十分である。

このように、蛇型ロボット動力学による運動解析と制御を組み合わせることで、より効率的でな運動の実現ができるものと考えられる。

謝辞

本研究の遂行に当たり御指導下さった茨城大学工学部システム工学科馬 書根助教授に深く感謝の意を表します。また、本論文をまとめるに際し、懇切な御指導と熱心な御討議を頂いた城 道介教授、浜松 芳夫教授に深く感謝します。また、研究において御意見、御協力下さいました同研究室、井上康介助手、同学科堤 泰行教授、石黒美佐子教授、乾 正知教授、新村 信雄教授、米沢 保雄助教授、新納 浩幸助教授、坪井一洋助教授、近藤 久講師、岩崎 唯史助手、梅津 信幸助手に感謝の意を表します。

在学中に多岐に渡り指導して頂いた馬研究室卒業生の皆様に感謝致します。特に、本研究に関し細やかな指導をして頂いた大豆生田 吉広氏（(株) Canon）、豊田 顕成氏（(株) SMC）に深く感謝します。

同研究室蛇型ロボットチームとしてゼミ等において熱心な討論を頂いた佐々木 亮氏、金 承華氏、田邊 裕基氏に深く感謝致します。

ゼミ等において熱心な討論を頂いた同研究室院生、Anshuka Srivastava 氏、野村 政英氏、張 磊氏川瀬 雅之氏、本田 良徳氏、付 清軍氏、柳田 聡氏、劉 順氏、並びに学部4年生の森園 和也氏、並びに研究生の藍 光平氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 広瀬, 生物機械工学, 工業調査会, 1987
- [2] G. Endo, K. Togawa and S. Hirose, Study on Self-contained and Terrain Adaptive Active Cord Mechanism, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'99), 1999, 1399—1405
- [3] <http://amesnews.arc.nasa.gov/releases/2000/00images/snakebot/snakebot.html>
- [4] M.Mori and S.Hirose, Development Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D mobility, in proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligence in Robotics and Systems, pp. 1152-1157, 2001
- [5] K.L.Paap, M.Dehlwisch, B.Klaassen, GMD-Snake: A semi-Autonomous Snake-like Robot, In Distributed Autonomous Robotic System 2, Springer-Verlag, Tokyo, 1996
- [6] 広瀬, 織田, 梅谷, 斜旋回機構を用いた索状能動態とその制御, 計測自動制御学会論文集, 17-6, pp.686, 1981
- [7] H. Hirose, S. Oda, Y. Umetani, An Active Cord Mechanism with Oblique Swivel Joint and Its Control, Proc. of 4th ROMANCY Smp., Zaborow, pp.395-407, 1981
- [8] 高梨, 青木, 谷嶋, 完全モジュラー型関節の開発と超多自由度ロボット「おろち」への適応, 日本ロボット学会第13回学術講演会予稿集, Vol.2, pp.1499-500, 1995
- [9] 高梨, 青木, 谷嶋, 超多自由度蛇型ロボット「おろち」の歩容制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会'96講演会論文集, Vol.A, pp.79-80, 1996
- [10] S. Ma, H. Araya, L. Li, Development of a Creeping Snake-Robot, in Proc. 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA'01), 2001, 77—82
- [11] 佐々木, 馬, 井上, 3自由度関節を有する蛇型ロボットの開発, 日本ロボット学会学術講演会 講演論文集 (CD-ROM), 2003.

- [12] J. Burdick, J. Radford, and G.S. Chirikjian, A Side-winding Locomotion Gait for Hyper-Redundant Robots, *Int. J. Advanced Robotics*, 9-3, 1995, 195-216
- [13] J. Ostrowski, J. Burdick, Gait Kinematics for a Serpentine Robot, in *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1996*.
- [14] K. Suzumori, S. Wakimoto, and M. Takata, A Miniature Inspection Robot Negotiating Pipes of Widely Varying Diameter, in *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2003*.
- [15] S. Ma, Analysis of Creeping Locomotion of a Snake-like Robot, *Int. J. of Advanced Robotics*, 15-2, 2001, 205—224
- [16] 内藤, 馬, 蛇型移動ロボットにおける蛇行運動の解析, *ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 講演会論文集, Vol. A, pp291-292, 1997*
- [17] Modeling and control of a snake robot with directional friction coefficients
- [18] M. Saito, M. Fukaya, T. Iwasaki, Serpentine Locomotion with Robotic Snakes, *Int. J. IEEE Control System Magazine*
- [19] Y. Ohmameuda, S. Ma, Control of a 3-dimensional Snake-like Robot, in *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2003*.
- [20] Y. Ohmameuda and S. Ma, Control of a 3-Dimensional Snake-like robot for Analysis of Sinus-lifting Motion, in *Proc. SICE Annual Conf., 2002*
- [21] M. Yamakita, M. Hashimoto, T. Yamada, Control of Locomotion and Head Configuration of 3D Snake robot, in *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2003*.
- [22] F. Matsuno, K. Suenaga, Control of Redundant 3D Snake Robot based on kinematic model, in *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 2003*.
- [23] 金, 井上, 馬, CPGを用いた蛇型ロボットの自律分散制御, *日本ロボット学会 学術講演会 講演論文集 (CD-ROM), 2003*.
- [24] N. Rashevsky, *Mathematical Biophysics, Vol2, Dover publication Inc. 1960*
- [25] G. Taylor, Analysis of swimming of long and narrow animals, *Proc. Royal Society of London, Vol. 214, pp. 158-183, 1952*
- [26] H. Hertel, *Structure-Form-Movement, Reinhold Publishing Corp. 1966*

- [27] 梅谷, ほふく運動の機構と制御の研究 (その2:滑走の力学とモデル実験), 第1回バイオメカニズムシンポジウム前刷, pp.253-260, 1970
- [28] 大野, 広瀬, 索状能動体の移動様式 sinus-lifting: 体幹形状の記述, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集 (CD-ROM), 2002
- [29] K. Shigeta, H. Date, S. Nakamura, and M. Sampei, Improvement of Manipulability for Locomotion of a Snake Robot by Mass Distribution, in Proc. SICE Annual Conf, 2002

発表論文

- [1] 田所・馬“斜面における蛇型移動ロボットの蛇行移動解析” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 予稿集 (CD-ROM),2003.
- [2] S. Ma, N. Tadokoro, B. Li, and K. Inoue Analysis of Creeping Locomotion Of a Snake robot on a Slope in Proc. 2003 IEEE Int. Cof. on Robotics and Automation (ICRA'03)
- [3] S. Ma, N. Tadokoro, K. Inoue, and B.Li Influence of Inclining Angle of a Slope to Optimal Locomotion Curves of a Snake-like Robot in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing (RISSP'03)
- [4] 田所・馬・井上“蛇型ロボットの斜面蛇行移動体形” 日本ロボット学会学術講演会 講演論文集 (CD-ROM), 2003.
- [5] 大豆生田・馬・田所・井上“3次元蛇型ロボットの動力学解析” 日本ロボット学会学術講演会 講演論文集 (CD-ROM), 2003.
- [6] 田所・馬・井上・田辺“蛇型ロボットの3次元斜面蛇行移動の運動解析” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 予稿集 (CD-ROM),2004(投稿中)

付 録 A 関節自由度を変化させた場合の影響の実験結果

第6章で行った関節の自由度を2自由度、3自由度と変化させた場合で定抗力運動及び2次元sinus-lifting運動をしたときの関節トルク及び抗力についての結果を示す。なお、傾斜角 5[deg] の場合の結果のみを一つの例として示す。

A.1 2DOF(yaw,pitch) steady motion

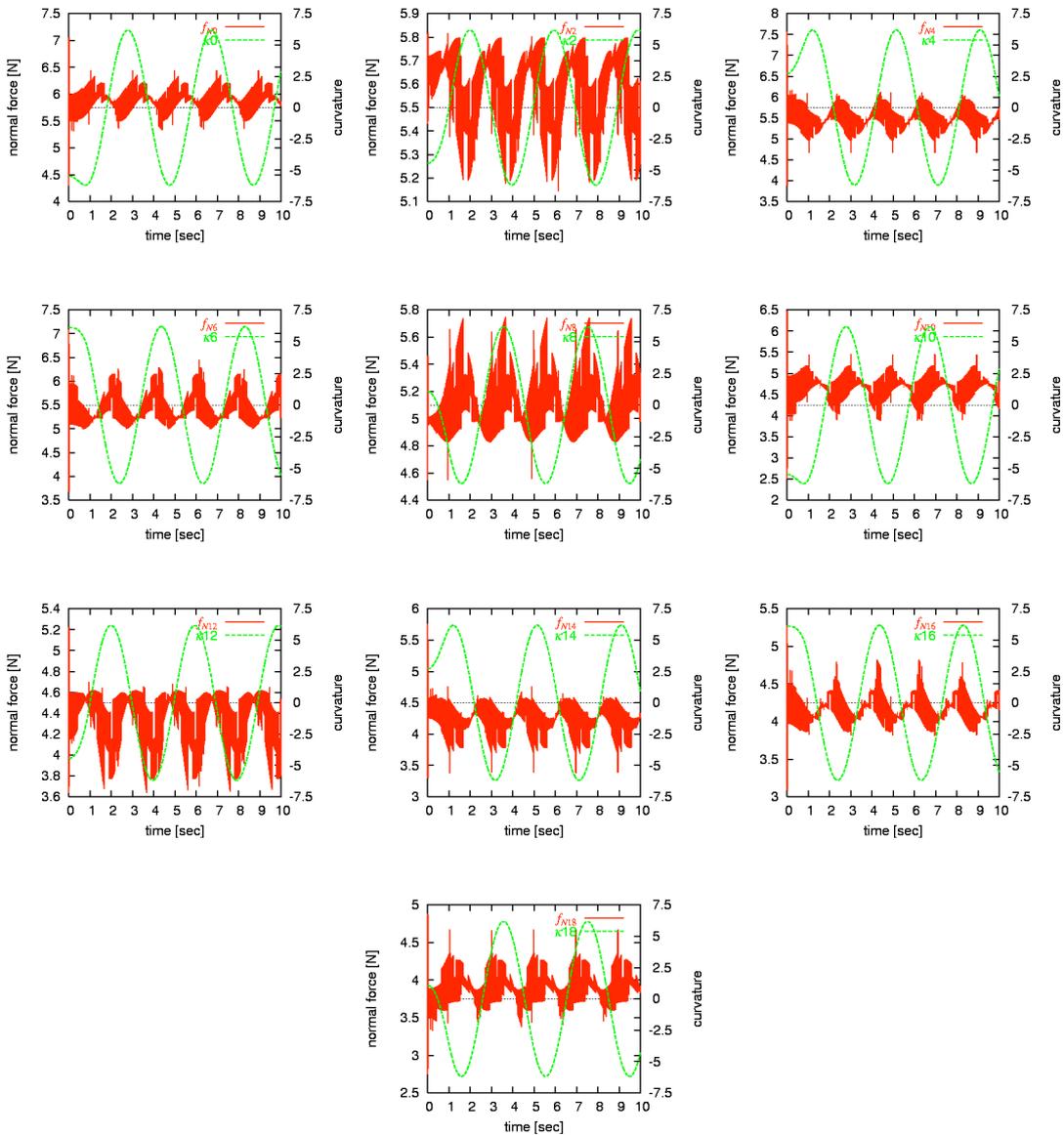


Fig. A.1: Normal force and curvature

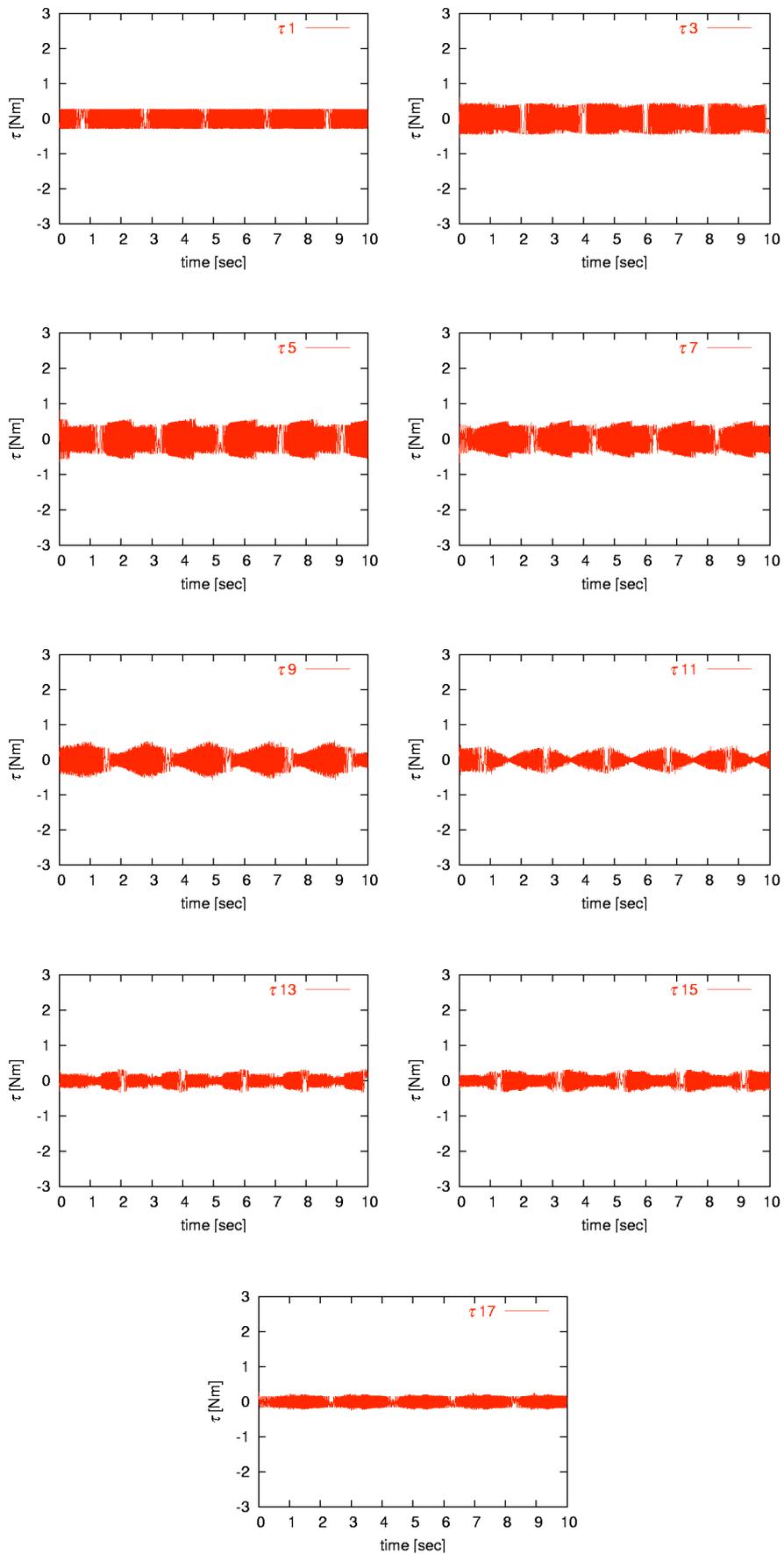


Fig. A.2: Pitch Torques

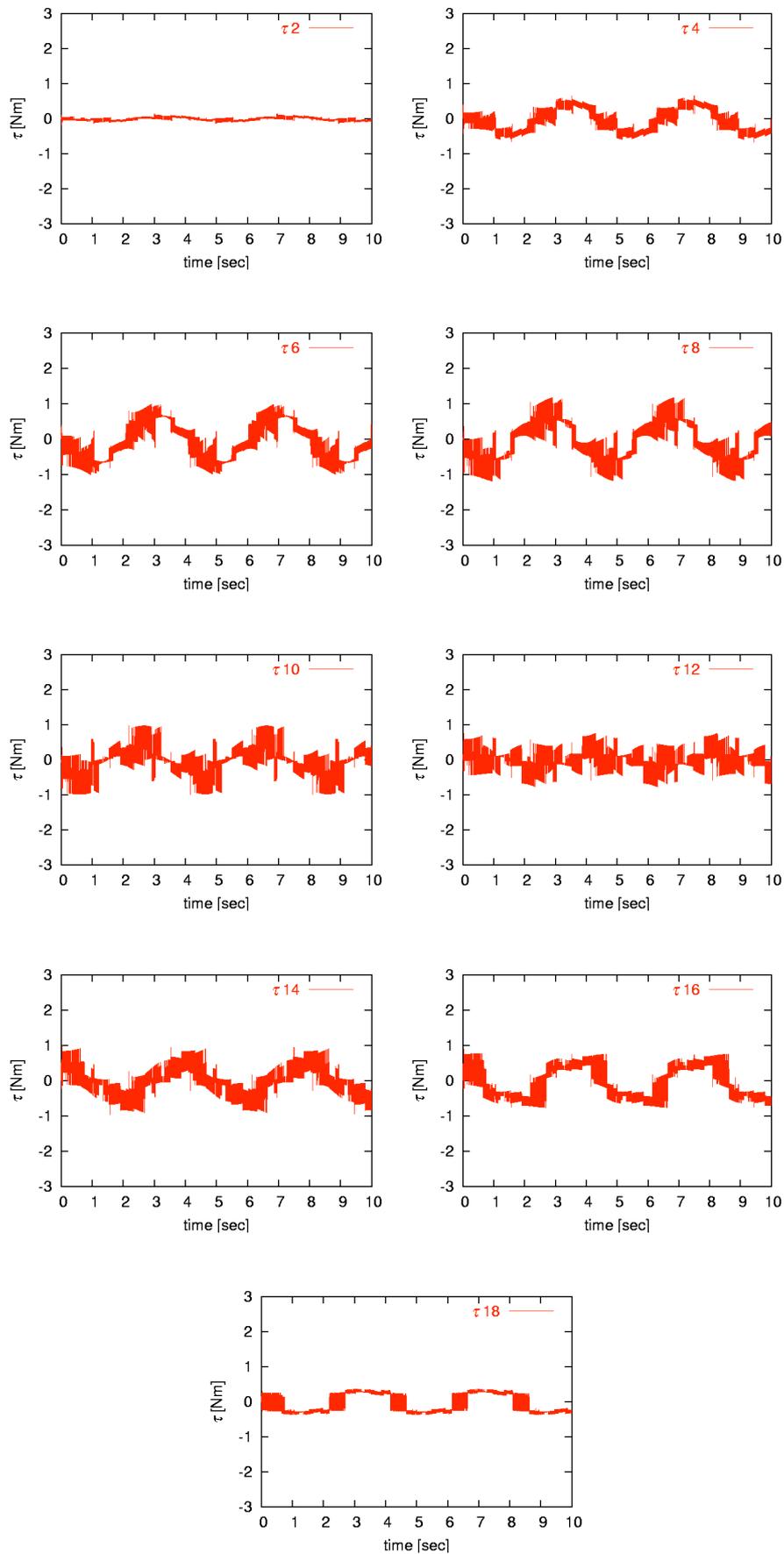


Fig. A.3: Yaw Torques

A.2 2DOF(yaw,roll) steady motion

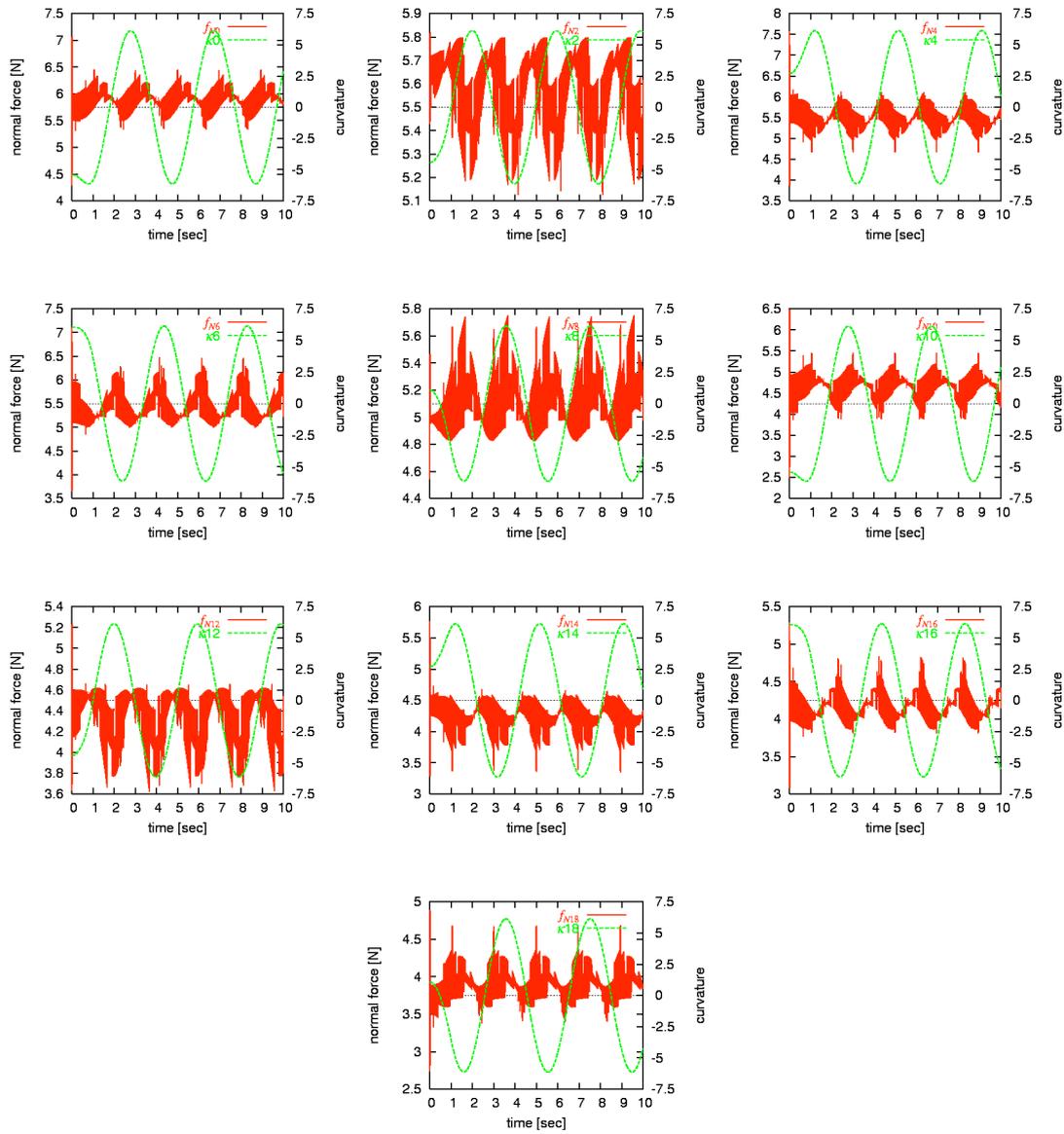


Fig. A.4: Normal force and curvature

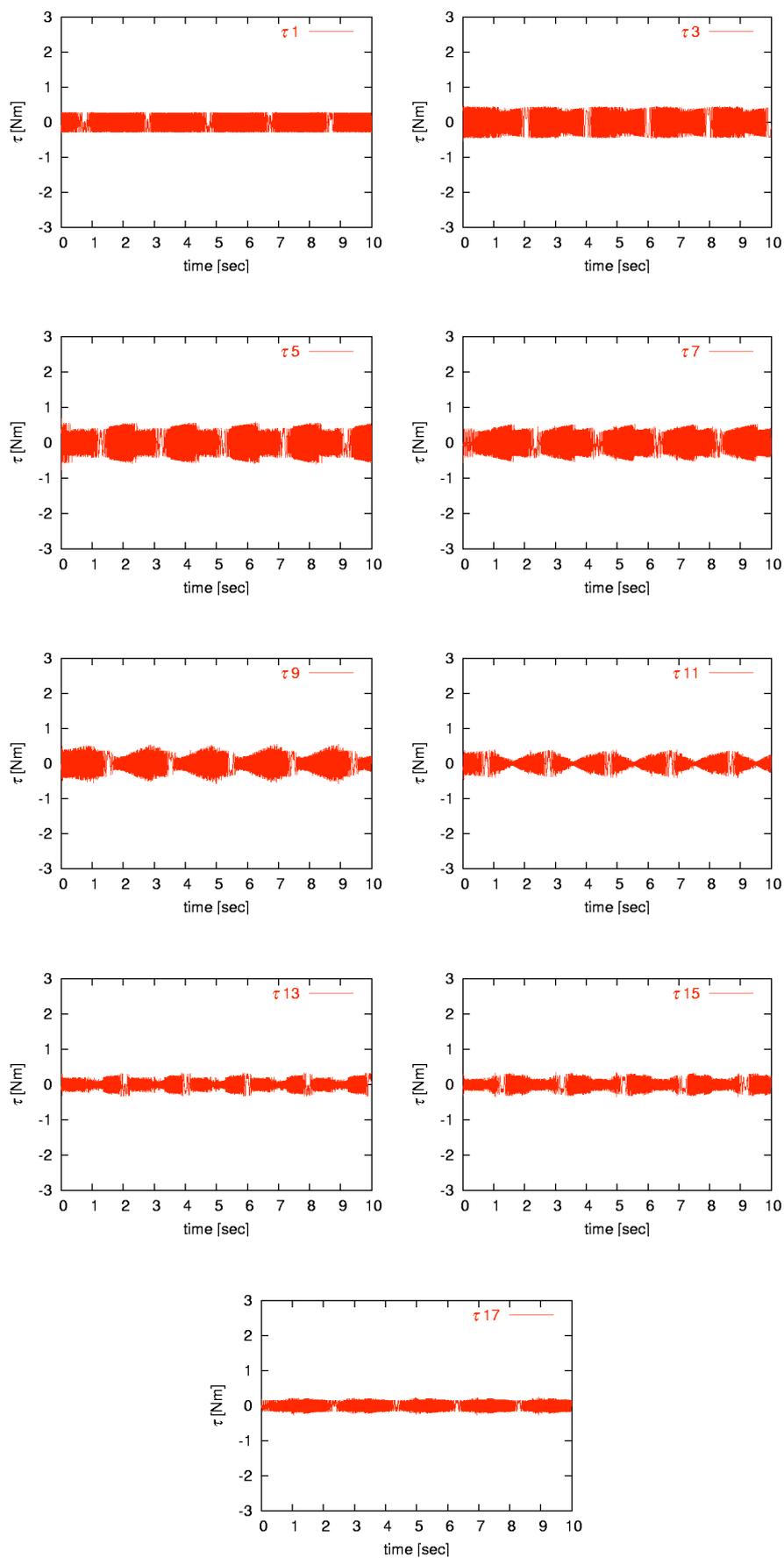


Fig. A.5: Roll Torques

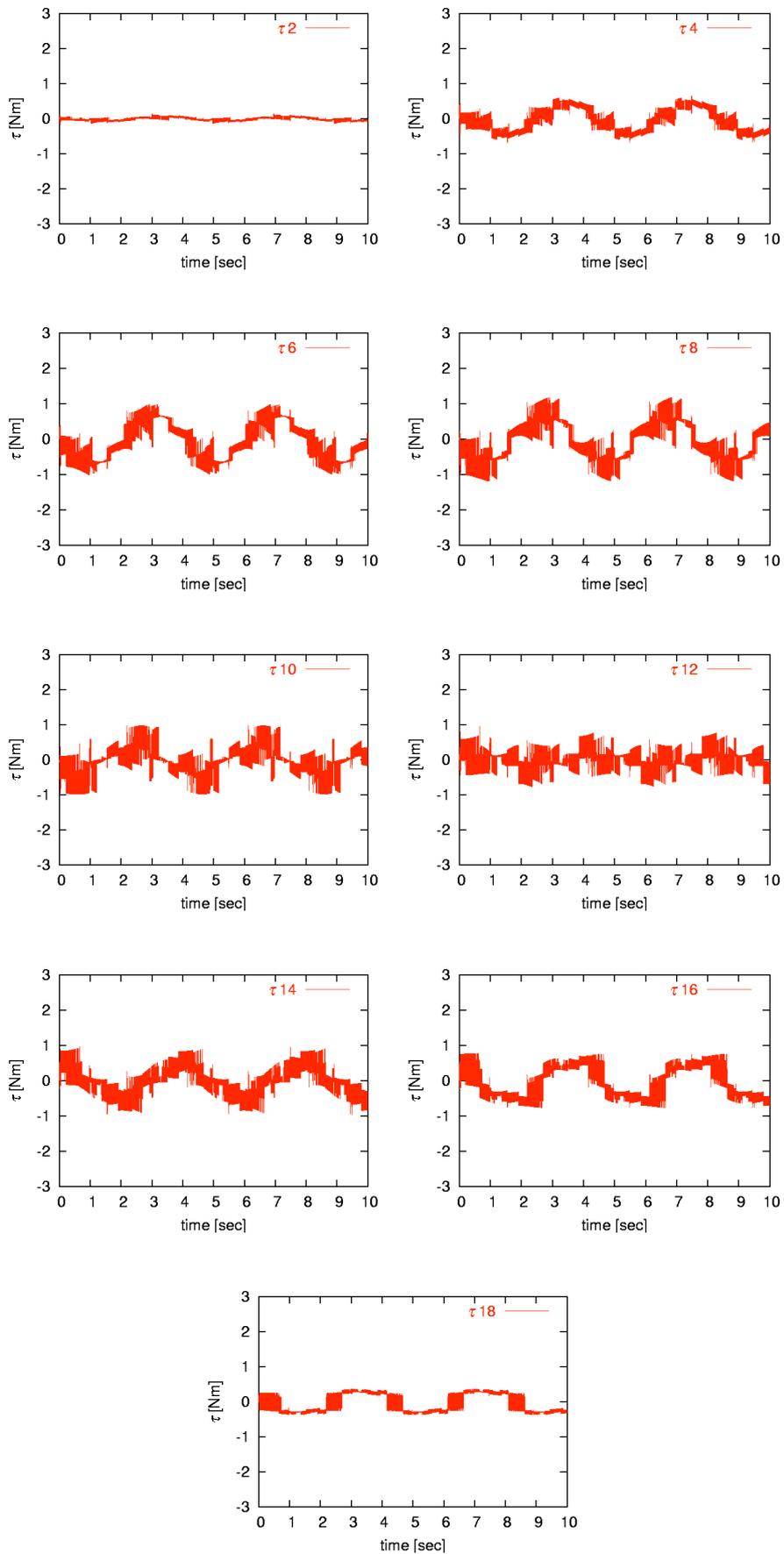


Fig. A.6: Yaw Torques

A.3 3DOF steady motion

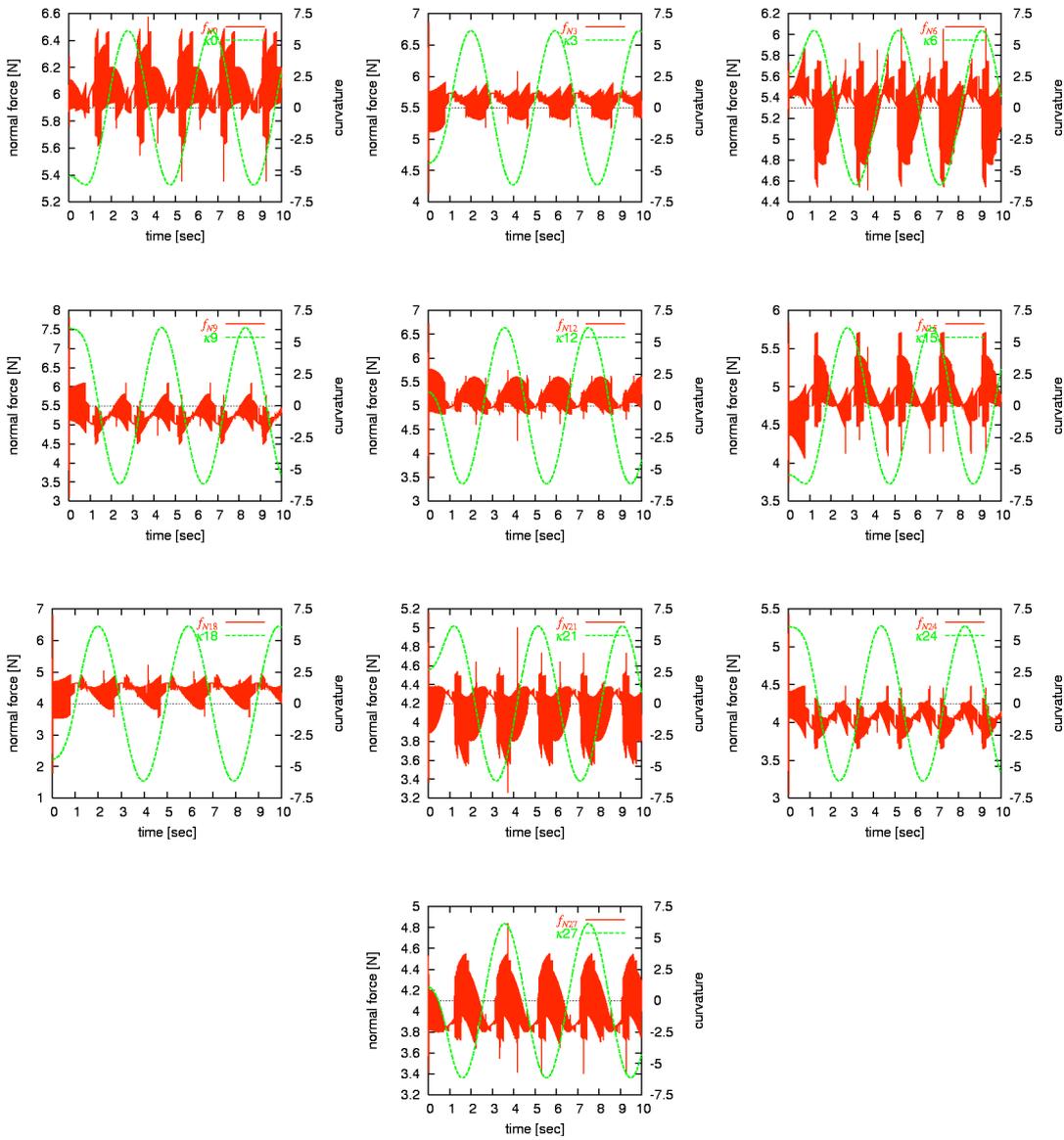


Fig. A.7: Normal force and curvature

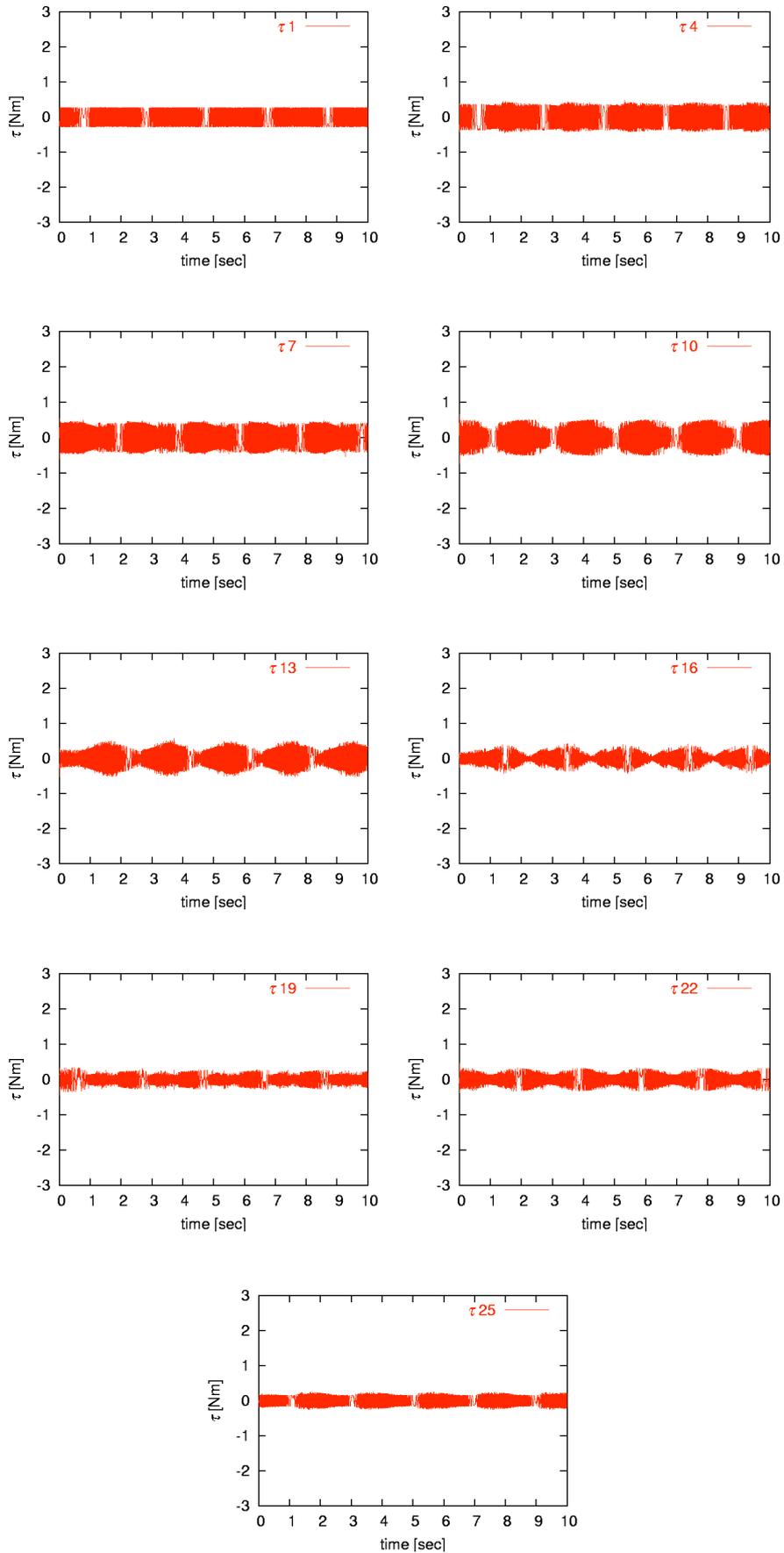


Fig. A.8: Pitch Torques

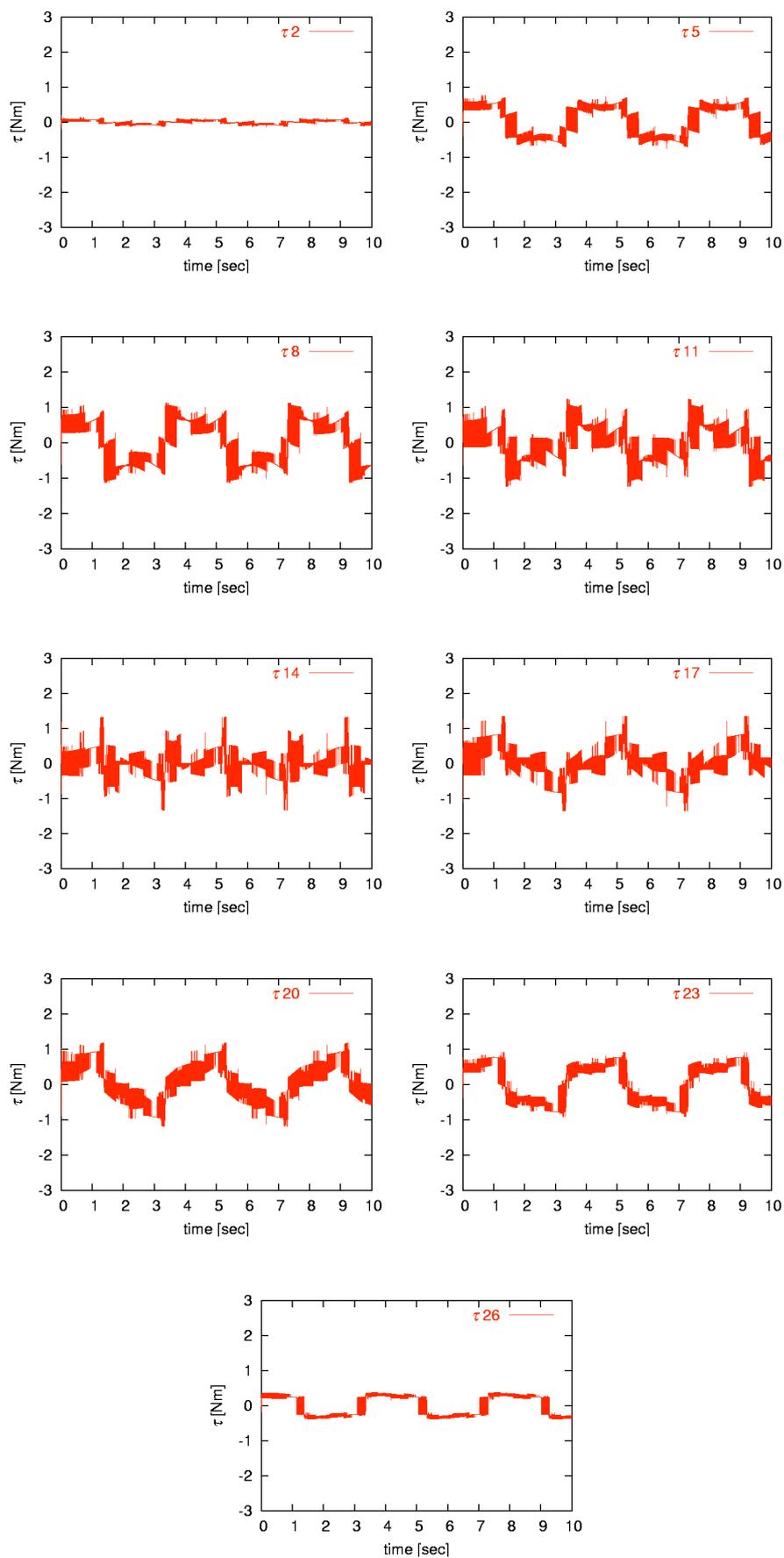


Fig. A.9: Yaw Torques

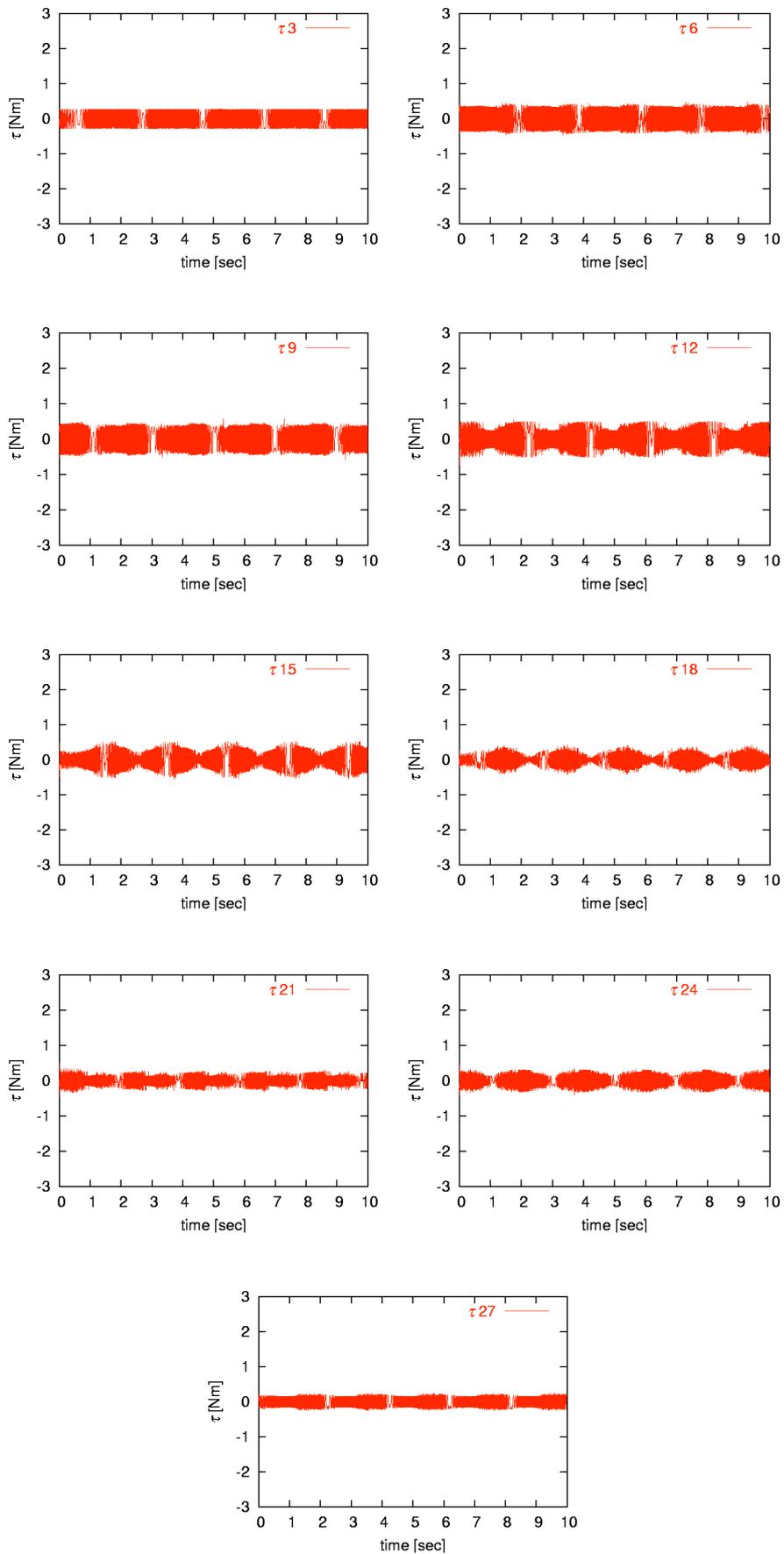


Fig. A.10: Roll Torques

A.4 2DOF(yaw,pitch) 2Dsinus-lifting

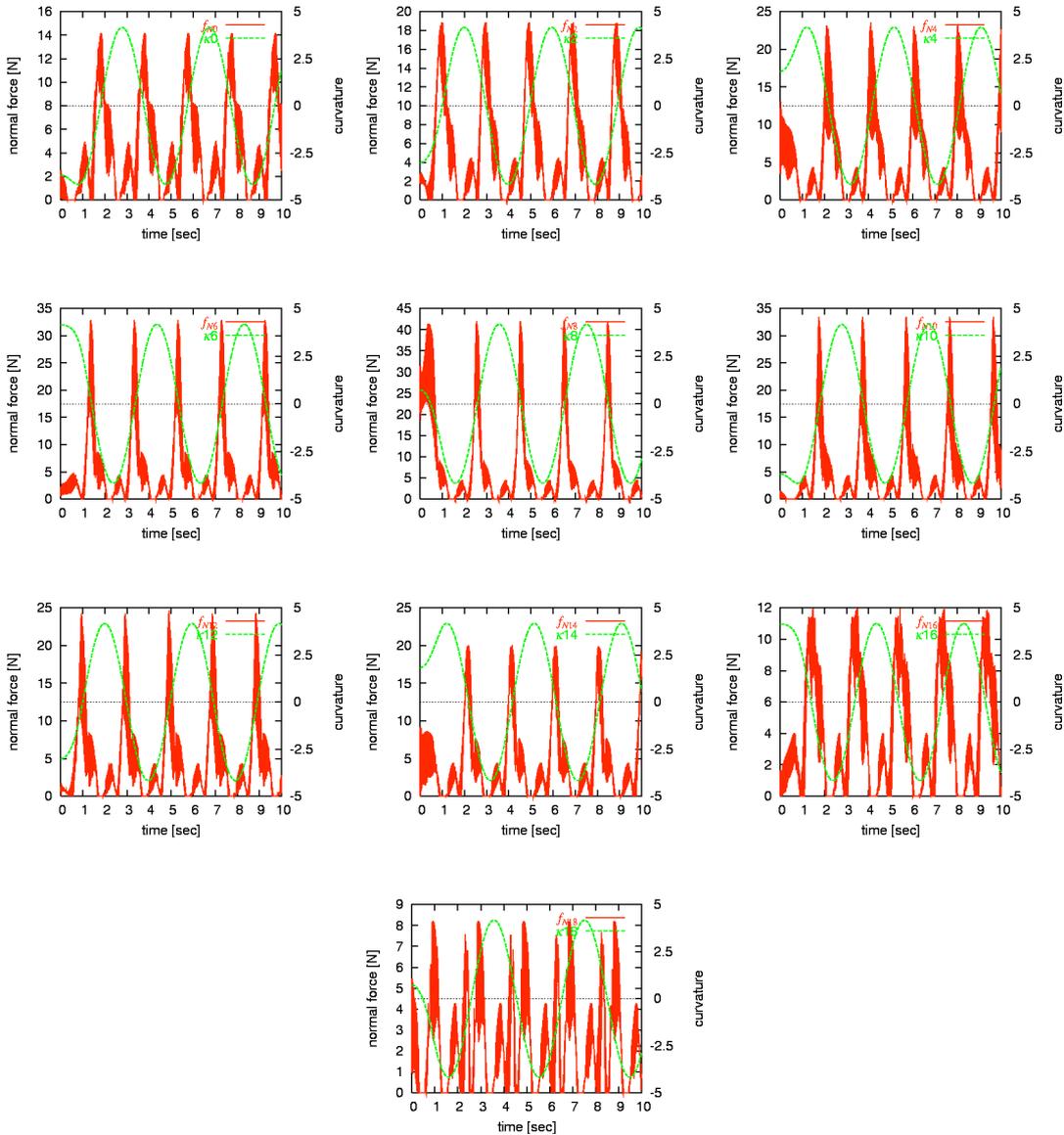


Fig. A.11: Normal force and curvature

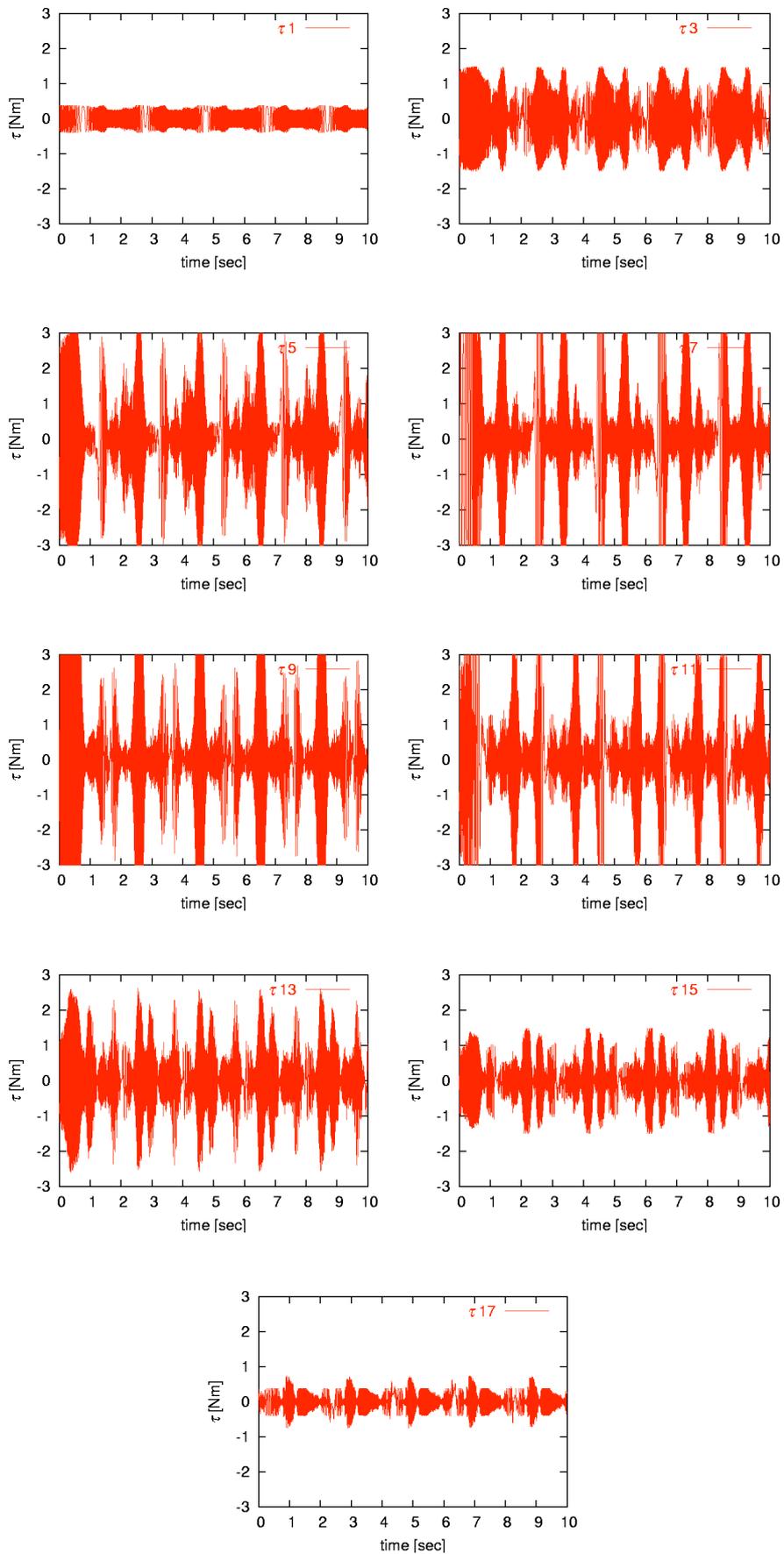


Fig. A.12: Pitch Torques

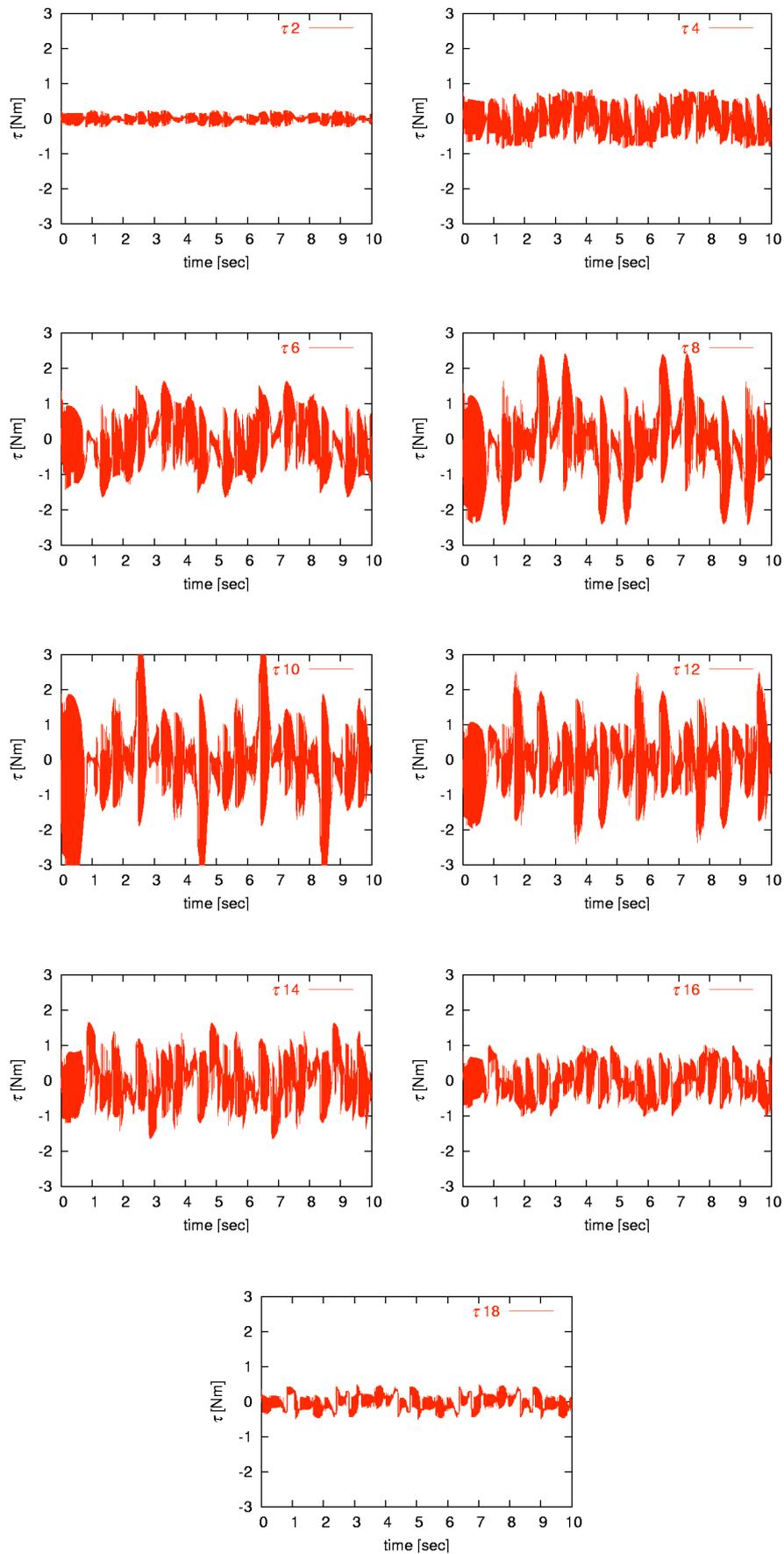


Fig. A.13: Yaw Torques

A.5 2DOF(yaw,roll) 2D sinus-lifting

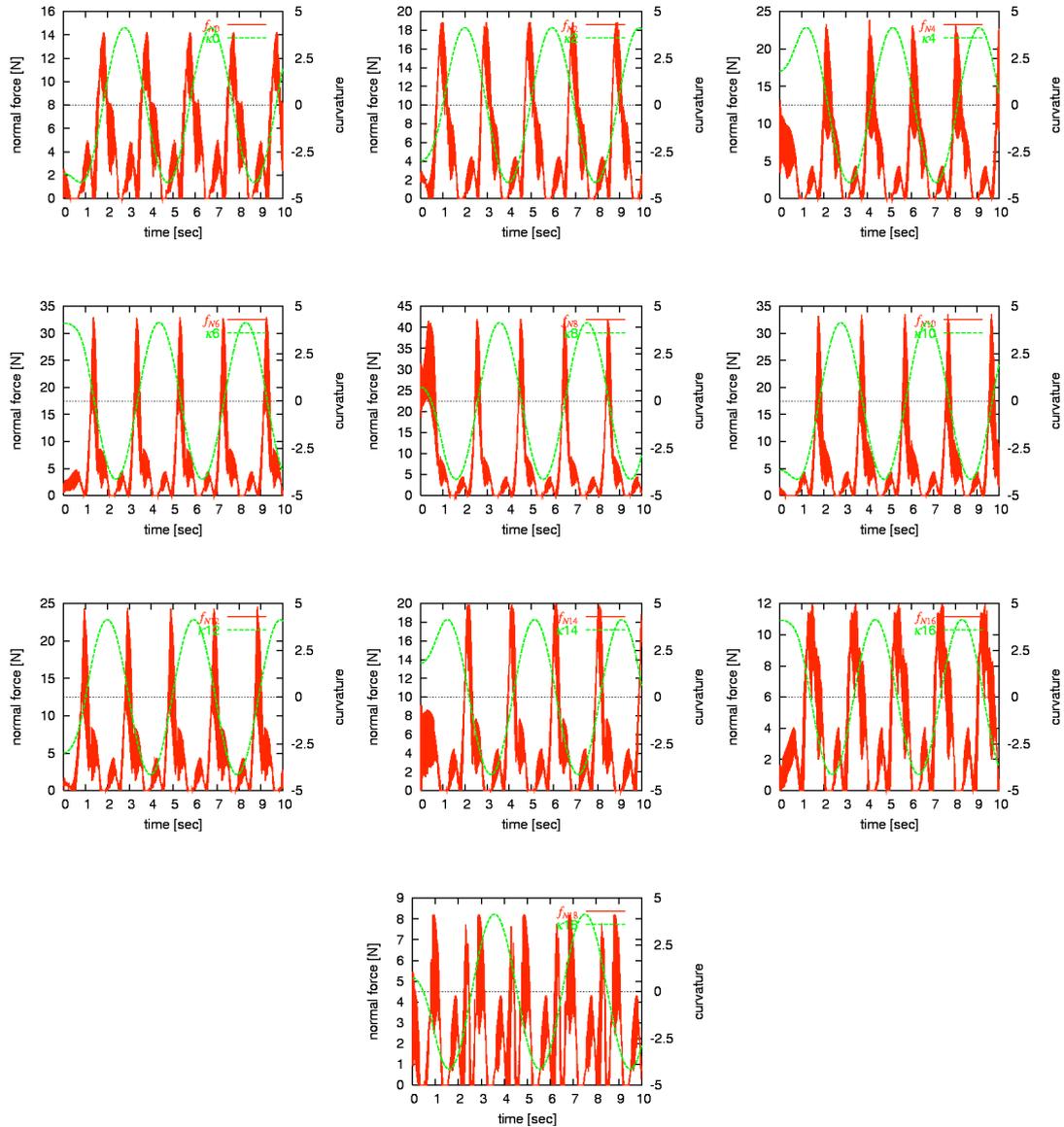


Fig. A.14: Normal force and curvature

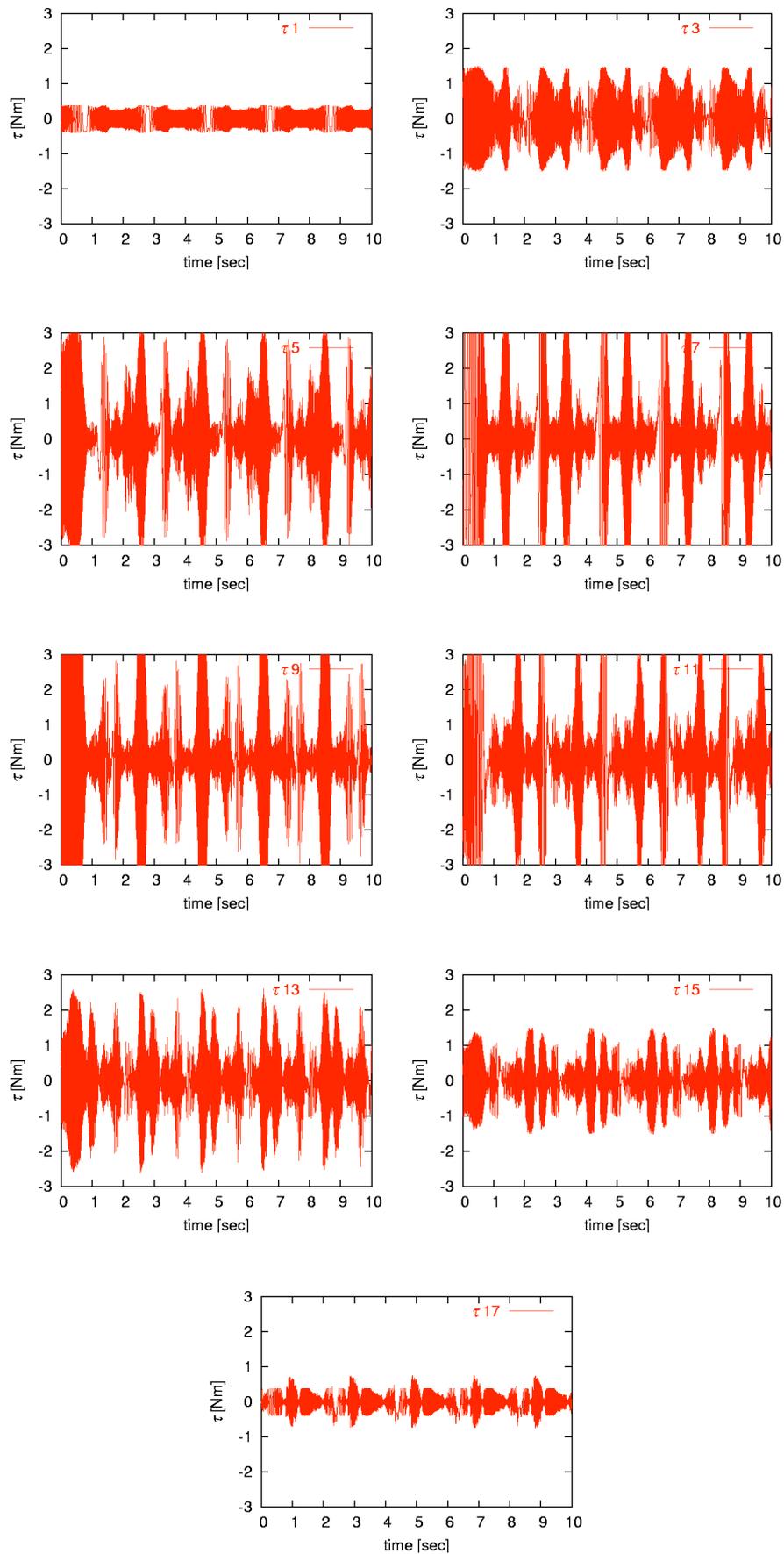


Fig. A.15: Roll Torques

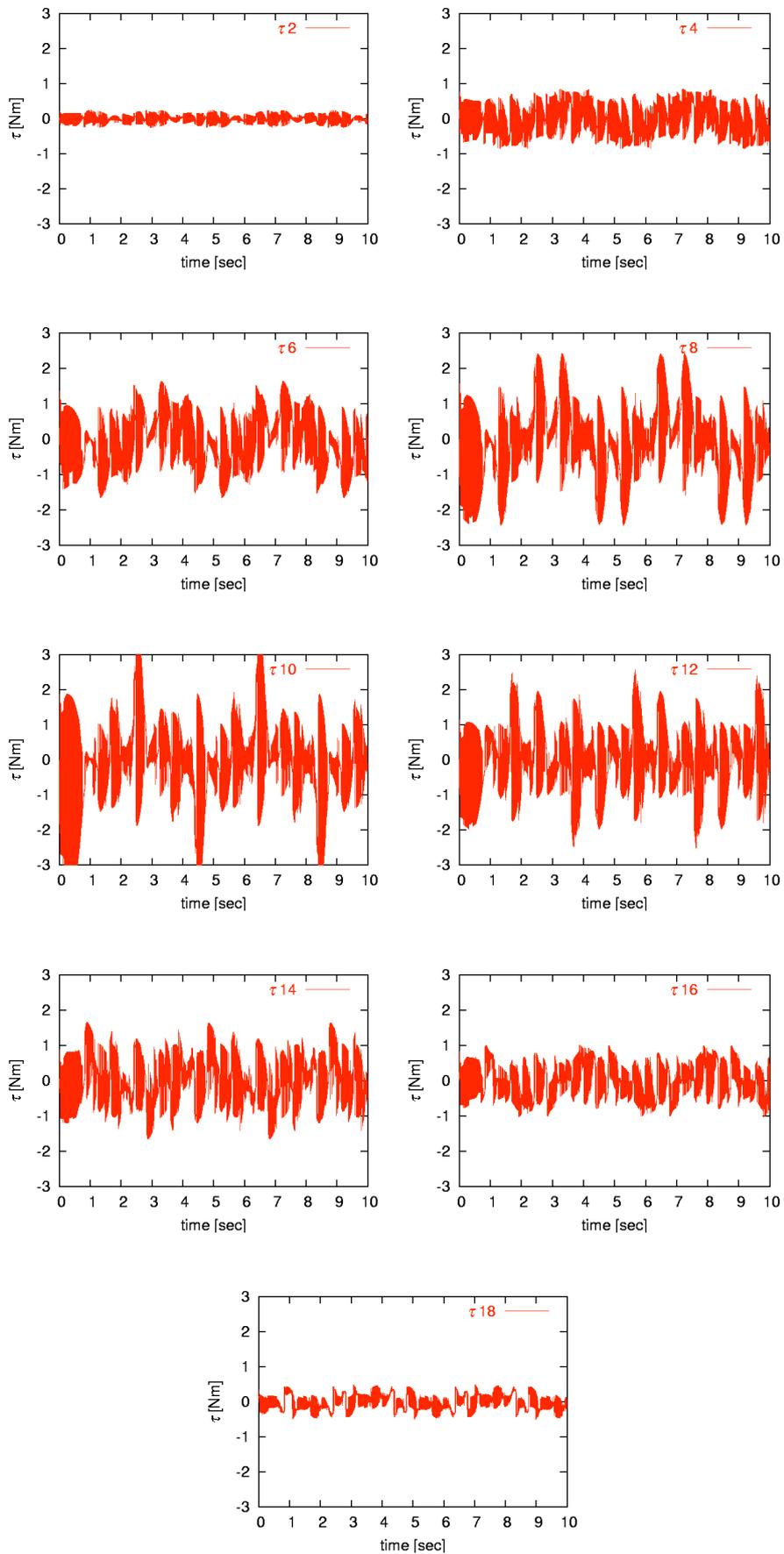


Fig. A.16: Yaw Torques

A.6 3DOF 2D-sinus-lifting

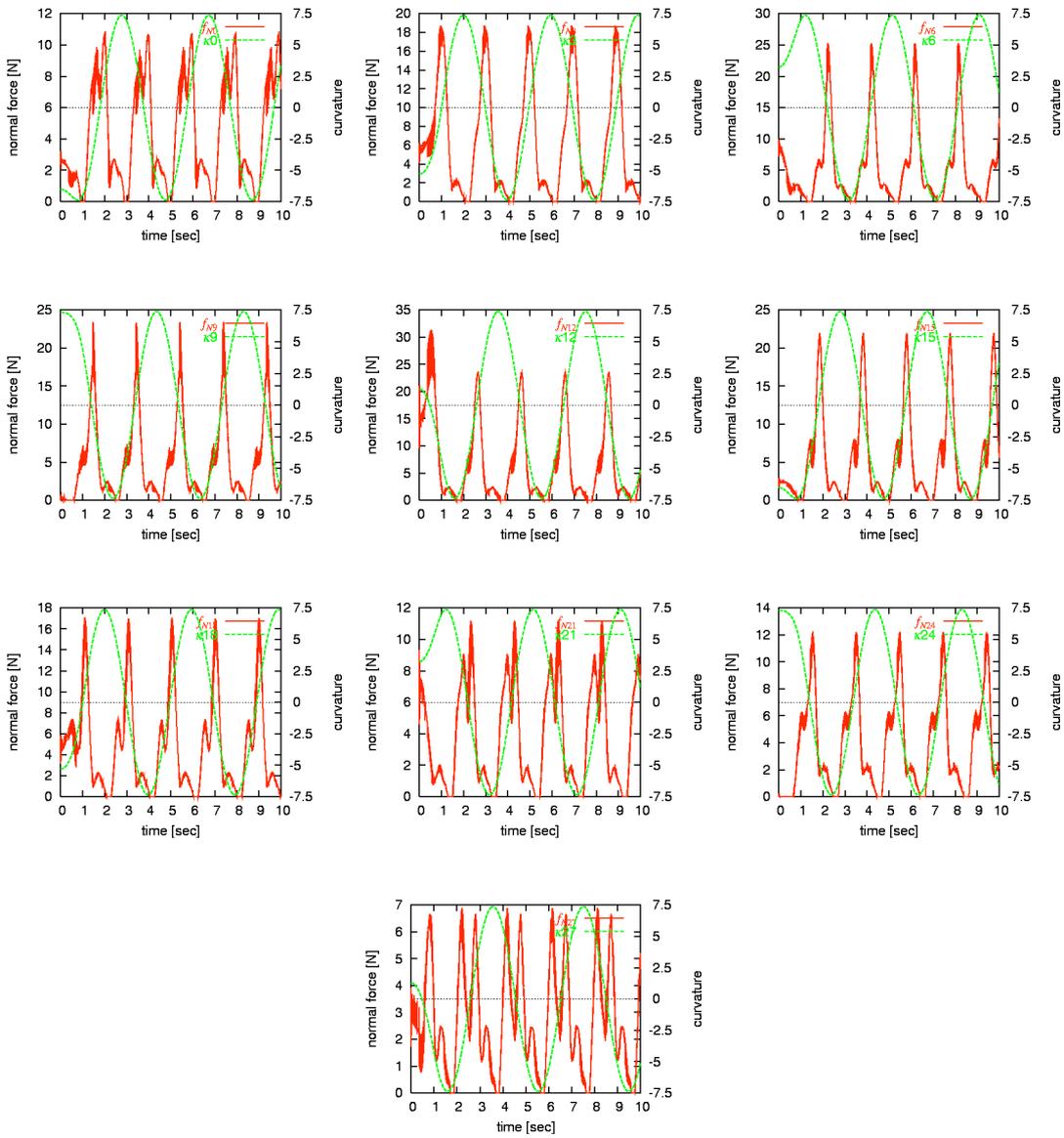


Fig. A.17: Normal force and curvature

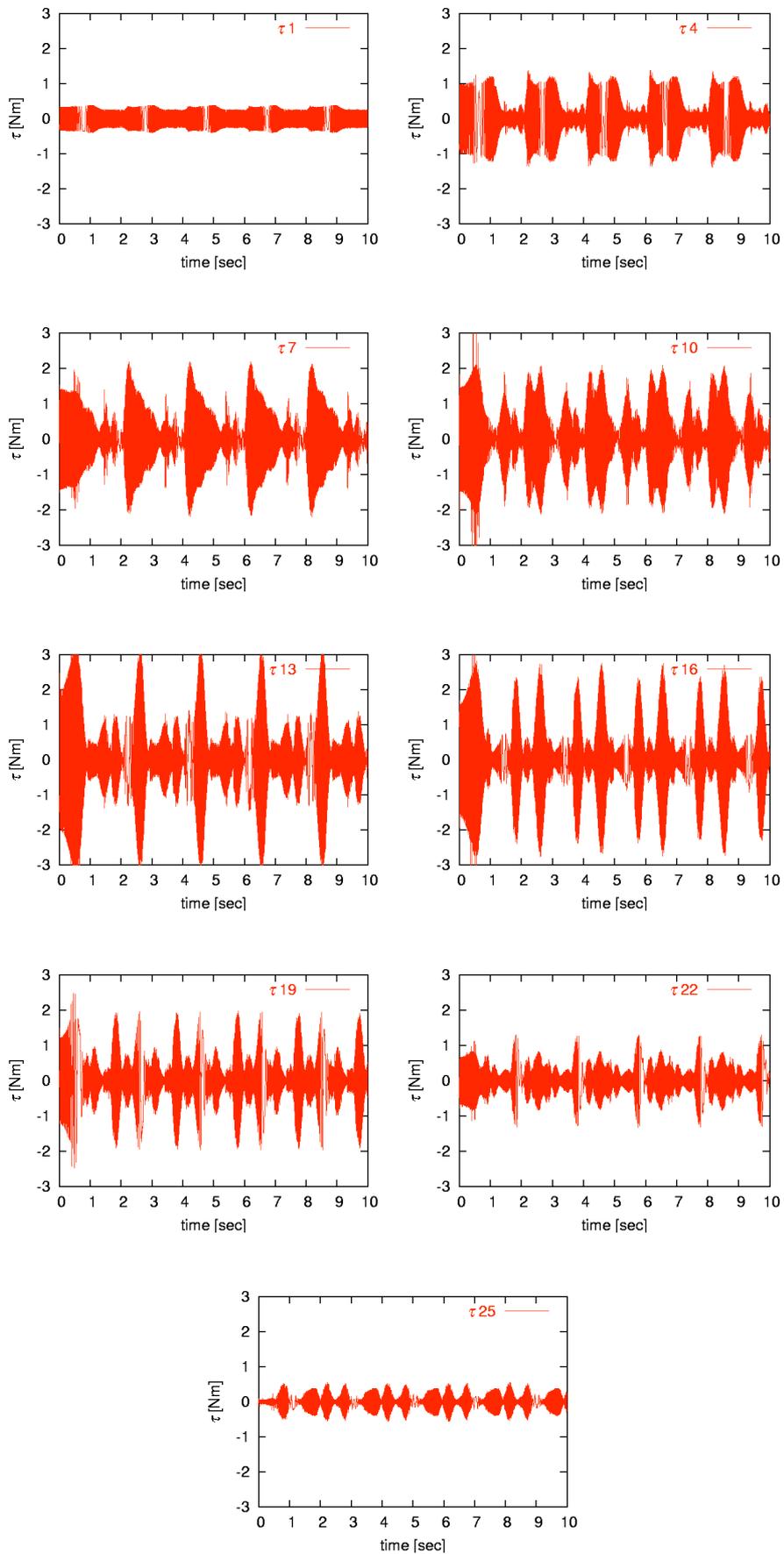


Fig. A.18: Pitch Torques

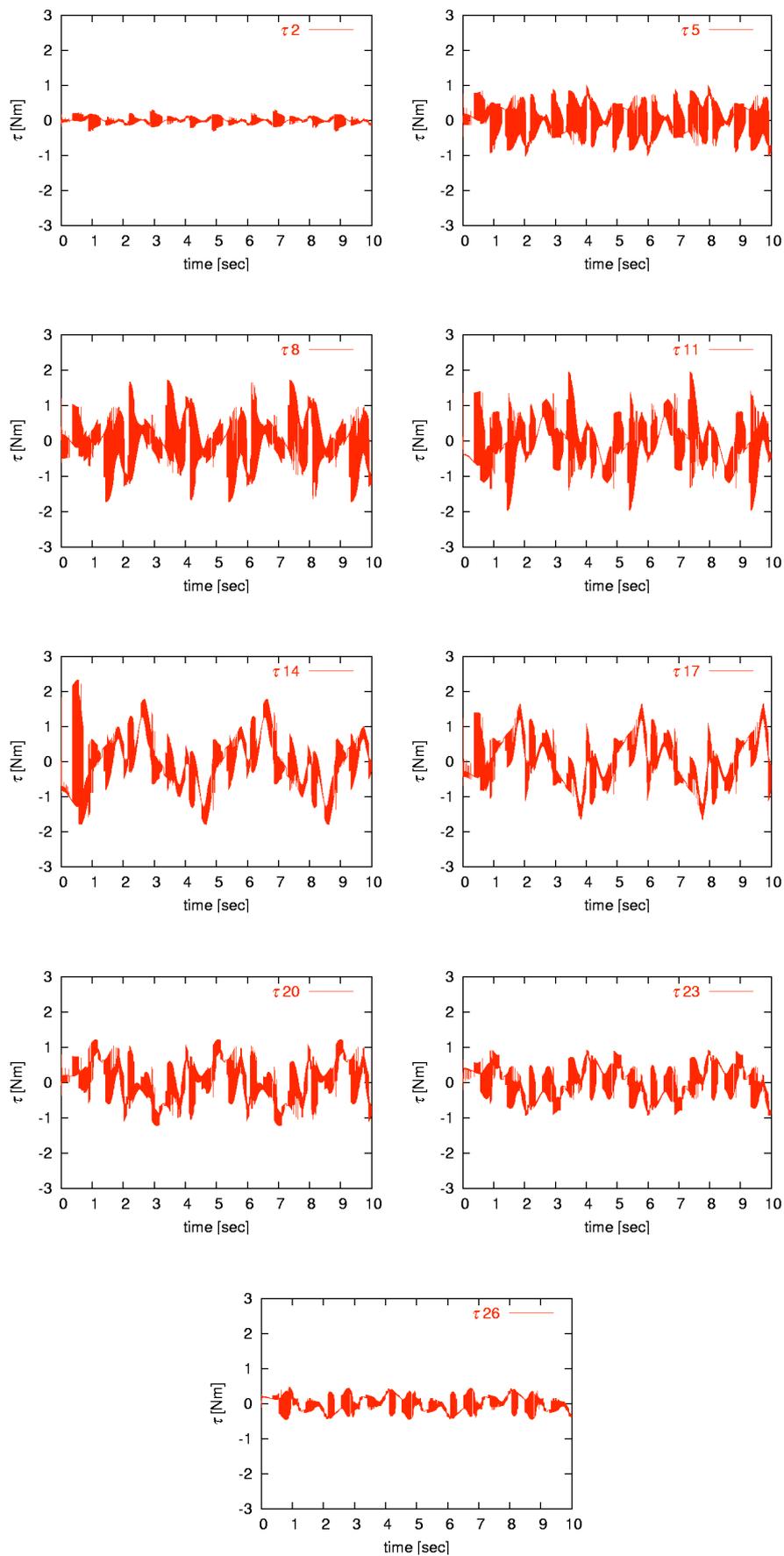


Fig. A.19: Yaw Torques

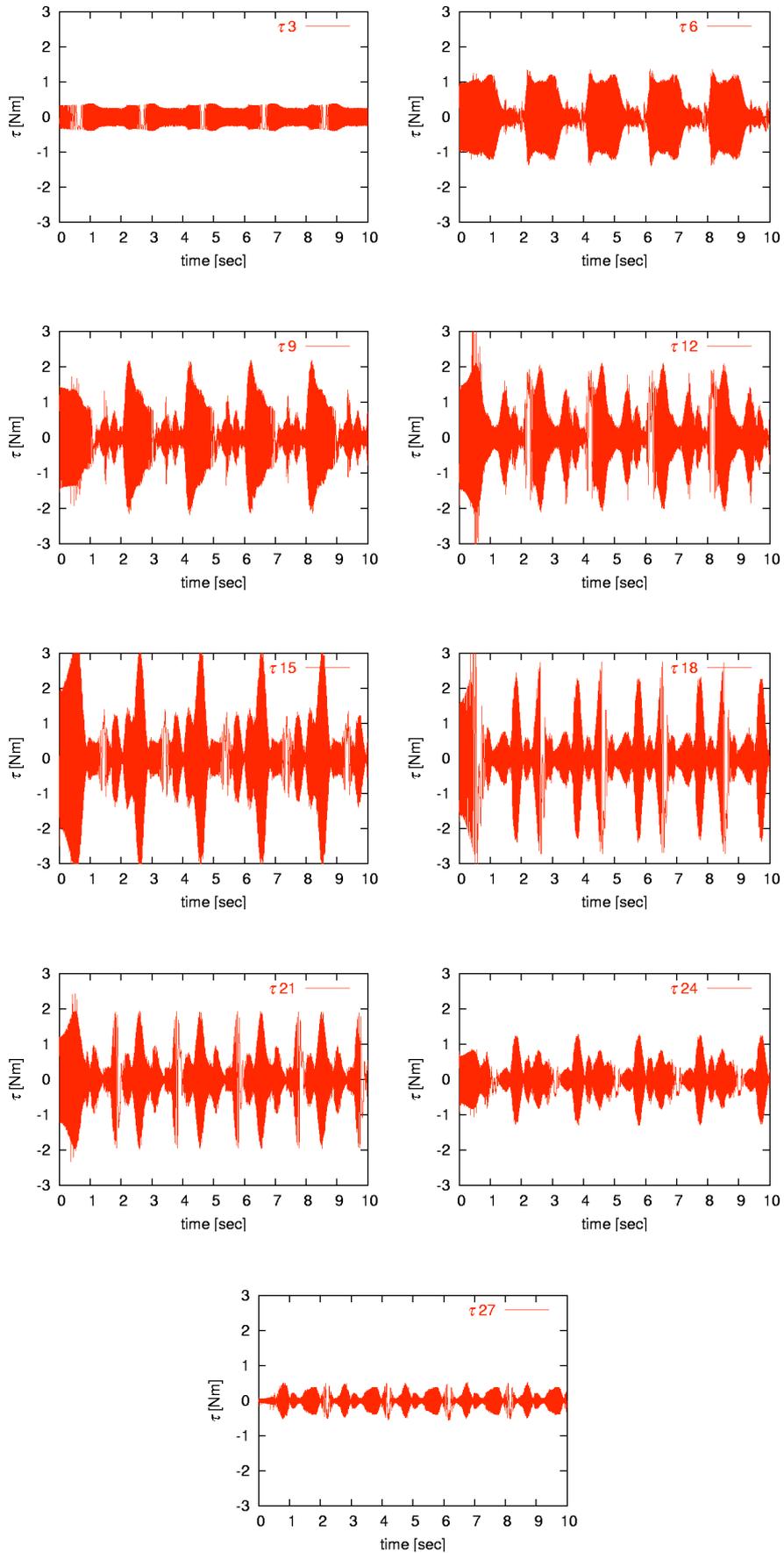


Fig. A.20: Roll Torques