

博士学位論文

生物規範型高出力関節機構に関する研究

指導教官 石井 和男

西田 祐也

-目次-

第1章	序論	2
1.1	研究背景	2
1.2	生物模倣型ロボット	4
1.3	研究目的	5
1.4	論文の構成	5
1.5	変数, 記号の約束一覧表	6
第2章	跳躍ロボットの設計指針	17
2.1	はじめに	17
2.2	無次元パラメータの導出	18
2.2.1	跳躍ロボットのモデル	18
2.2.2	無次元解析	18
2.3	跳躍ロボットの解析	20
2.3.1	出力質量比の導出	20
2.3.2	脚部の強度に関する質量比の導出	21
2.3.3	エネルギー伝達効率に関する質量比の最適化	22
2.4	跳躍ロボットの設計例	23
2.4.1	最低限必要な出力質量比の推定	23
2.4.2	バネ機構を有したロボットに必要な出力質量比の推定	24
第3章	バッタの跳躍機構	35
3.1	はじめに	35
3.2	バッタの跳躍メカニズム	36
3.2.1	バッタの脚構造	36
3.2.2	バッタの跳躍動作	36
3.3	出力特性の解析	37
3.3.1	膝関節のモデリング	37
3.3.2	ヤコビ行列	37
3.3.3	歩行動作時のトルクと角速度	38
3.3.4	跳躍動作時のトルクと角速度	39
3.4	出力特性のシミュレーション	41
第4章	高出力関節機構の開発	50
4.2	高出力関節機構の解析	51
4.2.1	高出力関節機構のモデル	51
4.2.2	モータの粘性係数	51
4.2.3	モータの減速比の割合	52

4.3	高出力関節機構の設計・制作	53
4.3.1	粘性測定実験	53
4.3.2	高出力関節機構の開発	54
第5章	性能評価実験	66
5.1	収縮力制御実験	66
5.2	伸長・屈曲動作（歩行動作）実験	67
5.3	跳躍動作実験	68
5.4	跳躍高さ測定実験	69
第6章	考察及び結論	79
6.1	跳躍ロボットの設計指針に関する考察	79
6.2	バッタの跳躍機構のまとめ	80
6.3	高出力関節機構のまとめ	82
6.4	生物規範型高出力関節機構の開発について	83
6.5	今後の展望	83
	謝辞	84
	参考文献	86

-図表一覧-

Fig. 1-1 Neo mechatronics society [1]	7
Fig. 1-2 DC motor characteristic [7]	7
Fig. 1-3 “Mowgli” developed by Tokyo University [30]	8
Fig. 1-4 “Hopper” developed by Sandia National Laboratories [31]	8
Fig. 1-5 Compact jumping developed by Nagoya Institute of Technology [32]	9
Fig. 1-6 “Tekken” developed by The University of Electro-Communications [33]	9
Fig. 1-7 “ROPID” developed by Robot Garage [34]	10
Fig. 1-8 Animal inspired jump robot developed by Toyama Prefectural University [35]	10
Fig. 1-9 Spherical soft robot by Ritsumeikan University [36]	11
Fig. 1-10 Throw and collect type inspector developed by Tokyo Institute of Technology [37] ..	11
Fig. 1-11 “BigDog” developed by Boston Dynamics [38]	12
Fig. 1-12 “AirHopper” developed by Tokyo Institute of Technology [39]	12
Fig. 1-13 Artificial finger developed by Tokai University [52]	13
Fig. 1-14 Linear mechanism developed by Tokyo Institute of Technology [53]	13
Fig. 1-15 Robot hand developed by Tokyo Institute of Technology [55][56]	14
Fig. 1-16 Jumping performance of locusts	14
Fig. 1-17 Joint mechanism developed by Lausanne [66][67]	15
Fig. 1-18 Joint mechanism developed by Kogakuin University [68][69]	15
Fig. 2-1 Power mass ratio of actuators [29]	25
Fig. 2-2 Model of jumping robot	25
Fig. 2-3 Jumping motion in two-mass jumping system	26
Fig. 2-4 Model of Leg	26
Fig. 2-5 \bar{W}_{\min} vs. \hat{m} under \hat{J} and \hat{c} is constant	27
Fig. 2-6 Optimal \hat{m} vs. \hat{J} and	27
Fig. 2-7 Mass rate vs. M	28
Fig. 2-8 Each mass under $M=0.1-1.0[\text{kg}]$	28
Fig. 2-9 Each mass under $M=1.0-10[\text{kg}]$	29
Fig. 2-10 Estimated \bar{W}_{\min} needed for joint mechanism	29
Fig. 2-11 Power mass ratio of general motor	30
Fig. 2-12 Jumping motion in robot with spring	30
Fig. 2-13 Estimated \bar{W}_{\min} needed for motor	31
Fig. 2-14 \bar{W}_{\min} depend on v_{acc}	31
Fig. 3-1 Locust legs [62]	42
Fig. 3-2 Hind-leg of locust	42

Fig. 3-3 Semi-lunar process in hind-leg [62]	43
Fig. 3-4 Jumping process	43
Fig. 3-5 Lump effect	44
Fig. 3-6 Model of jumping mechanism of locust	44
Fig. 3-7 Link vectors	44
Fig. 3-8 Waling motion	45
Fig. 3-9 Jumping motion	45
Fig. 3-10 Torque and angular velocity during extension	46
Fig. 3-11 torque and angular velocity during flexion	46
Fig. 3-12 Torque and angular velocity during jumping motion	47
Fig. 3-13 Power during jumping motion	47
Fig. 4-1 Model of high power joint mechanism	55
Fig. 4-2 Viscosity of motor with gear	55
Fig. 4-3 Experiment device	56
Fig. 4-4 Measurement device	56
Fig. 4-5 Result of viscosity measurement experimentation	57
Fig. 4-6 Motor viscosity due to current	57
Fig. 4-7 Overview of designed joint mechanism	58
Fig. 4-8 Detail of drive unit	59
Fig. 4-9 Detail of spring unit	59
Fig. 4-10 Detail of joint	60
Fig. 4-11 Parallel links	60
Fig. 4-12 Link vectors of designed joint mechanism	61
Fig. 4-13 System of high power joint mechanism	61
Fig. 4-15 Bottom view of control board	62
Fig. 4-16 Overview of developed joint mechanism	63
Fig. 4-17 Side view of developed joint mechanism	63
Fig. 5-1 Basic motion experiment	70
Fig. 5-2 Result of force control of extensor	70
Fig. 5-3 Result of force control of flexor	71
Fig. 5-4 Force control and angle of extensor during extension and flexion	71
Fig. 5-5 Force and angle of flexor during extension and flexion	72
Fig. 5-6 Angle and angular velocity during jumping motion (small pulley)	72
Fig. 5-7 Comparing angular velocity of machine (small pulley) and simulation ($\mu=4.0 \times 10^{-7}$)	73

Fig. 5-8 Comparing angular velocity of machine (small pulley) and simulation ($\mu=8.0 \times 10^{-7}$)...	73
Fig. 5-9 Angle and angular velocity during jumping motion (big pulley)	74
Fig. 5-11 Jumping experiment	75
Fig. 5-13 jumping motion without viscosity effect.....	76

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究背景

少子高齢化に起因し将来の労働力不足や3Kと呼ばれる作業の労働人口の不足が懸念されている。2030年には65歳以上の高齢者が全人口の3割を超え、現役の労働者数が全人口の半数まで落ち込むことが予想されている。労働力が不足する状況において、人の生活の質(QOL: Quality Of Life)を維持することは最も重要な課題の一つであり、幼児や児童の安全性の確保、労働者のサポート、病人や高齢者の生活補助などが欠かせない。労働力の減少を補完しながらQOLを維持するため、ロボット技術の社会への導入や新しいサービス市場の開拓が期待されている(Fig.1-1 参照) [1-3]。しかし、現在のロボット技術は人の生活空間で運用可能な段階までは到達しておらず、ロボット技術を社会に導入するには、ロボットに用いられる様々な要素技術に関する研究開発が必要である[4]。

著者らは、ロボットの活動範囲拡大を目的とし、ロボットによる跳躍や歩行動作等の移動技術について研究を行っている[5][6]。ロボットの設計における大きな制約条件の一つがアクチュエータである。アクチュエータの性質として、高トルクで動作させる場合は低速、高速で動作させる場合には低トルクで動作する。アクチュエータを定格の動作範囲で駆動させた場合、減速機等を用いて Fig.1-2 に示す効率(出力/入力)が高い領域に動作点を存在させることが一般的である [7]。ここで、出力とは、力[N]と速度[m/s]、もしくはトルク[Nm]と角速度[rad/s]を掛け合わせた仕事率[W]である。本論文で議論する跳躍運動は運動の主体であるロボット自身を上方に加速し射出する運動であるため、高出力なアクチュエータが不可欠である[8]。

これまでに、多くの跳躍ロボットが研究されており[9-29]、大別すると次の4つに分類することができる。

- (a) 跳躍動作に特化したロボット
- (b) 歩行動作に特化したロボット
- (c) 跳躍と車輪移動が可能なロボット
- (d) 跳躍と歩行動作が可能なロボット

(a)に分類される代表的なロボットを Figs.1-3~5 に示す。(a)のロボットは瞬間的に大きな出力が出せるアクチュエータを搭載しており、高い跳躍高さを実現している[30-32]。しかし、跳躍高さの調節が容易ではなく、また跳躍以外の動作ができないことより、用途が限定される。Fig.1-6~8 に示されるような (b) に属するロボットは、歩行により連続して移動することができるが、跳躍高さが低い(もしくは跳躍できない)ため高い障害物を跳び越えることは困難である[33-35]。Fig.1-9, 1-10 に示す (c) のロボットは、跳躍と走行の2つの移動が可能である[36-37]。杉山らが開発した柔軟ロボット (Fig.1-9) は、円の中心から放射状に配置された8つのSMAコイルにより円周上の弾性殻(天然ゴム)を変形させることで、

接点回りに重力によるモーメントを発生させ、地面を転がるように移動する。また、跳躍動作は、弾性殻を収縮・弛緩させることで発生する反発力を用いて行っている[36]。ワタリらが開発した跳躍・回転移動体は DC モータと車輪で走行を行い、圧力タンクに蓄えられた圧縮空気を用いて跳躍を実現している[37]。しかしながら (c) のロボットは可搬重量や搭載空間に課題がある。Fig.1-11, 1-12 に示されるような (d) のロボットは、跳躍と歩行動作の両方を同じアクチュエータで実現している[38-39]。Boston Dynamics 社で開発された BigDog は 4 足歩行のロボットで、2 ストローク単気筒ガソリンエンジンと油圧アクチュエータを用いてスムーズな歩行を実現している。また、ギャロップ走行や跳躍して障害物を跳び越えることも可能である[38]。菊池らは、空気圧アクチュエータを用いた 4 足歩行ロボット AirHopper を開発した。AirHopper は 680mm の高い跳躍動作とスムーズな歩行動作が可能である[39]。油圧や空気圧式アクチュエータにはメンテナンス性や制御性において課題が多い。

上記で述べたように、跳躍や歩行のどちら片方の動作に特化したロボットは小型なシステムであるのに対し、跳躍と走行または跳躍と歩行動作が可能なのは大型（もしくは複雑）なシステムが必要である。これは、既存の DC モータなどの小型アクチュエータの出力が低いことが原因と考えられる。したがって、DC モータを用いたロボットで跳躍や歩行動作を実現するためには、DC モータの性能の低さを機械的に補い、機能性を向上させる関節機構の研究が重要である。

多くの関節機構は、歯車やカム、ボールねじ、リンク機構を用いることで高い減速比を実現しており、入力されるトルクより高いトルクを出力することが多い (Fig.1-13 参照) [40-54]。減速比としての役割を持つ関節機構において、力と速度は前述のようにトレードオフの関係であるため、減速比が固定であれば、力か速度のどちらか一方の要求を満たすことしかできない。この問題を解決するため、高木らは、Fig.1-14, 1-15 に示すような負荷感応無段変速機を有する関節機構を考案した[55-56]。高木らの関節機構は、エンドエフェクタに加わる負荷に応じてリンクの状態が変化することにより、負荷が大きい場合は減速比が大きくなる。負荷が加わっていない場合には高速に動作し、物体を把持した場合には力強く動作する。しかしながら、他のアクチュエータと同様、力強くかつ高速（高出力）に動作することが困難である。山田らは、飛び移り座屈 (Snap-through buckling) を利用した関節「柔軟カタパルト」を開発し、跳躍動作や遊泳動作を実現している (Fig.1-5 参照) [57]。飛び移り座屈とは、帯状の柔軟物を S 字に湾曲した状態からアーチ状に瞬間的に変形する現象である。飛び移り座屈によって発生する出力は、柔軟物の材質や形状に依存するため、瞬間的に大きな出力となるが、連続的に出力を調節することは容易ではない。本研究では、上記で述べた関節機構の問題点を改善し、伸張・屈曲動作（歩行動作）、瞬発動作が可能で高出力関節機構の実現を目指す。

1.2 生物模倣型ロボット

自然界には、移動する手段に跳躍を用いる動物が数多く存在する[58]. 犬や猫の胴体から食料となる血液を手に入れるために、ノミは体長の10倍以上の高さまで跳躍することが報告されている. ノミはレジリンと呼ばれるゴム状のタンパク質にエネルギーを蓄え、蓄えたエネルギーを瞬間的に解放することで跳躍動作を行っている[59]. 商業用ゴムが蓄えられたエネルギーの85% (残り15%は熱として発散される) を放出するのに対し、レジリンは97%のエネルギーを放出可能である. 体長約50[mm]のサバクトビバッタは、ノミと同様にレジリンにエネルギーを蓄積・解放することで、最大約250[mm]の高さまで跳躍する [60]. 連続跳躍して移動するカンガルーは、着地時に発生する衝撃エネルギーを自身のアキレス腱に蓄え、そのエネルギーを次の跳躍に利用することで効率の良い移動を実現している[61]. 動物はレジリンや腱などの受動的な弾性要素 (生体バネ) を積極的に用いることで、高い跳躍や効率の良い移動を行うことができる[62-63]. 人間に関してもカンガルーと同様に腱にエネルギーを蓄えて跳躍力を向上させていることが報告されている[64-65]. したがって、この動物が持つ生体バネを規範することで、高出力な関節機構が実現できると考えられる. ただし、ノミは跳躍に特化した構造であるため跳躍以外の動作ができない. またカンガルーは、筋肉 (腱) 自体に弾性要素があるため、機構に応用することは困難である. 一方、バッタは歩行と跳躍の両方の動作が可能で、エネルギーの蓄積を外骨格で行っているため、機構に応用することが容易である. 本研究ではアクチュエータにはモータを用い、関節の構造を工夫することにより新たな関節機構を実現することを目標とし、バッタの跳躍機構に着目した.

バッタやコオロギなどのバッタ目に属する昆虫は力強い後脚を保有しており、この後脚による跳躍は逃避や移動の手段としてもいられている. Fig.1-16 にバッタの跳躍性能を示す. バッタは、筋肉の駆動方法により跳躍と歩行動作を切り替え、エネルギーの解放機構を有することなく跳躍動作を行っていることが報告されている[60]. したがって、バッタの後脚を模倣することにより、跳躍や歩行動作が可能な軽量かつ高出力な関節機構が開発できると考えられる. Kovacらはバッタを規範した7[g]の跳躍ロボットで1.0[m]の跳躍高さを実現し、三浦らはコオロギを模倣することで跳躍と歩行が可能なロボットを開発している[66-69]. Fig.1-17 に Kobac らが開発した跳躍ロボットの関節機構, Fig.1-18 に三浦らが開発した跳躍ロボットの関節機構を示す. Kobac らの跳躍機構は、カムとバネで構成されており、本質的にバッタの跳躍機構と異なる[66-67]. 三浦らの跳躍機構はコオロギを模倣しており、2つの異なるバネ定数を持つバネとリンクで構成されている. 歩行時にはバネ定数の低いバネ、跳躍時にはバネ定数の高いバネを収縮し、クラッチで蓄えたエネルギーを解放している [68-69]. 三浦らの跳躍機構も Kobac らと同様に、本質的にコオロギの跳躍機構と異なる.

1.3 研究目的

本研究では、跳躍や歩行動作が可能な小型で高出力な関節機構を開発することを目的とする。バッタの跳躍機構を規範とすることで、エネルギーを蓄積・解放することで高い跳躍性能を発揮でき、関節の位置制御が可能な高出力関節機構の実現を目指す。また開発した関節機構で跳躍動作を行い、本関節機構の有効性を示す。

1.4 論文の構成

第2章では、目標の跳躍性能を実現するために関節機構に最低限必要な単位質量当たりの出力（出力質量比）を推定する方法について述べる。また、推定した出力質量比が市販されているDCモータで実現可能であるか検証を行う。第3章では、バッタの跳躍機構をモデル化し、外積で導出されるヤコビ行列を用いてバッタの跳躍機構の出力特性を解析する。また、バッタの跳躍機構が搭載しているアクチュエータ以上の出力を発生できることを示す。第4章では、第2, 3章で得られた知見をもとに設計した高出力関節機構について述べる。第5章では、高出力関節機構の有効性を検証するために行った性能評価実験、及び跳躍実験について述べる。

1.5 変数, 記号の約束一覧表

【定数, 係数の表記】

k_{im}	: 衝撃係数	
n	: 乗数	
π	: 円周率	
k_{sp}	: バネ定数	[N/m]
ρ	: 密度	[kg/m ³]
E	: ヤング率	[N/m ²]
μ	: 直線方向の粘性係数	[Ns/m]
$\tilde{\mu}$: 回転方向の粘性係数	[Nms/rad]
D	: 材料で決定する係数	

【変数の表記】

l	: 加速距離 or リンク長	[m]
h	: 跳躍高さ	[m]
d	: 脚部の直径	[m]
m	: 各部の質量	[kg]
M	: 全質量	[kg]
θ	: リンクの絶対角度	[rad]
φ	: 関節の角度	[rad]
v	: 速度	[m/s]
$\dot{\theta}$: 角速度	[rad/s]
g	: 重力加速度	[m/s ²]
f	: 粘性抗力	[N]
F	: 跳躍力 or 収縮力	[N]
τ	: 負荷トルク	[Nm]
T	: トルク	[Nm]
\bar{W}	: 出力質量比	[W/kg]
\bar{W}_{\min}	: 最低限必要な出力質量比	[W/kg]
\hat{m}	: 負荷質量比	
\hat{c}	: 強度に関する質量比	
\hat{J}	: 跳躍比	

【ベクトルの表記】

l	: l のベクトル
θ	: θ のベクトル
$\dot{\theta}$: $\dot{\theta}$ のベクトル
f	: f のベクトル
F	: F のベクトル
τ	: τ のベクトル
T	: T のベクトル

【行列の表記】

J	: 伸長・屈曲動作時のヤコビ行列
G	: 跳躍動作時のヤコビ行列

【その他の約束】

※ハットは無次元パラメータを表す

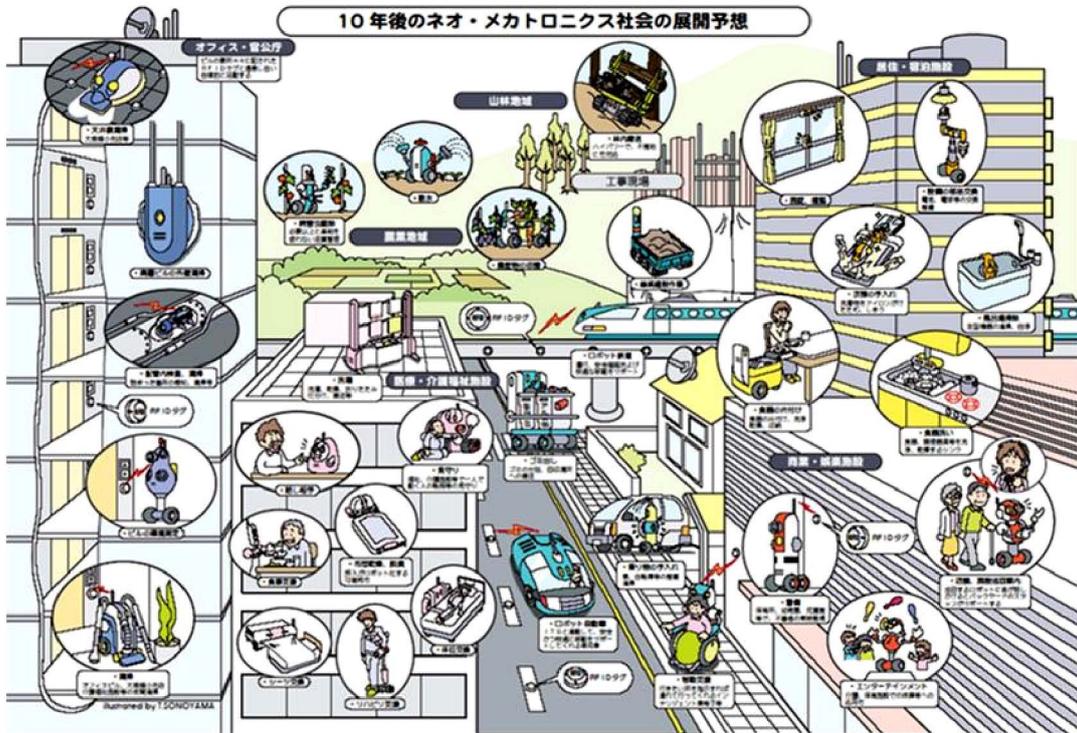


Fig. 1-1 Neo mechatronics society [1]

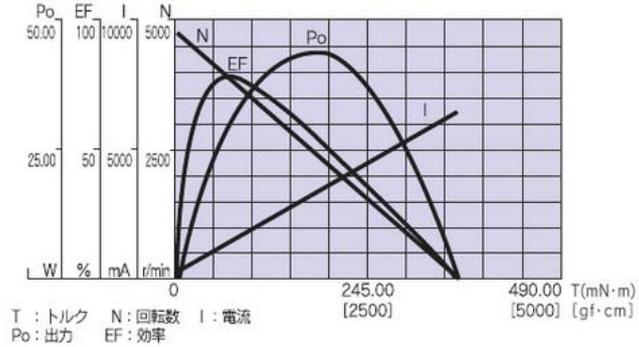


Fig. 1-2 DC motor characteristic [7]

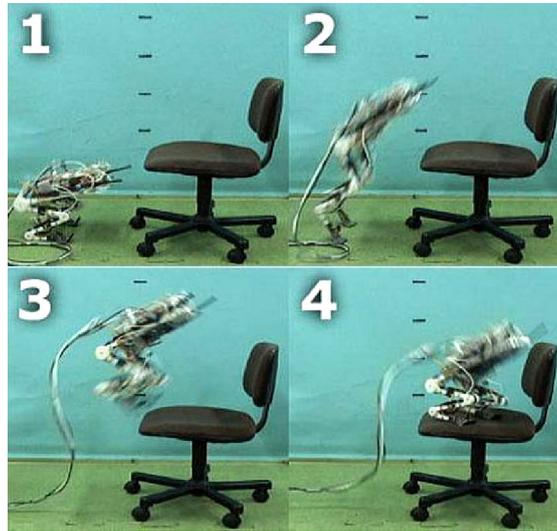


Fig. 1-3 “Mowgli” developed by Tokyo University [30]



Fig. 1-4 “Hopper” developed by Sandia National Laboratories [31]

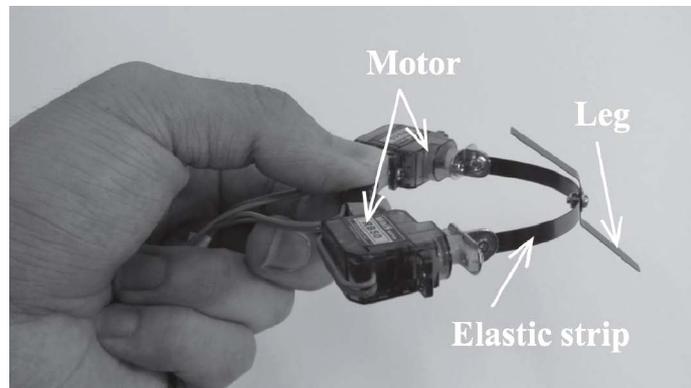


Fig. 1-5 Compact jumping developed by Nagoya Institute of Technology [32]



Fig. 1-6 “Tekken” developed by The University of Electro-Communications [33]



Fig. 1-7 “ROPID” developed by Robot Garage [34]

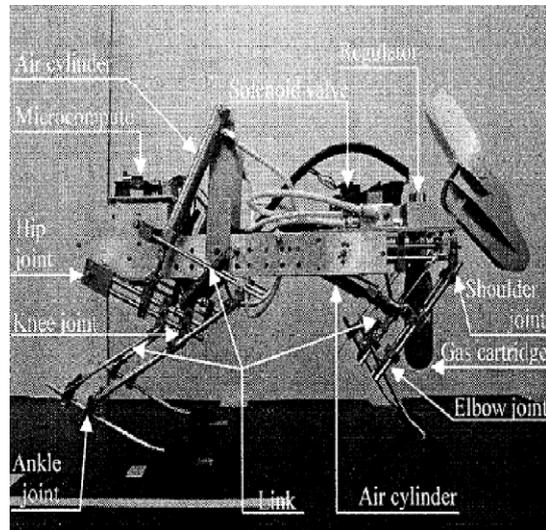


Fig. 1-8 Animal inspired jump robot developed by Toyama Prefectural University [35]

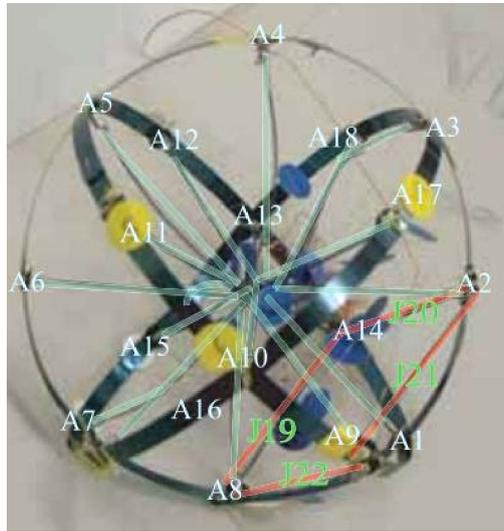


Fig. 1-9 Spherical soft robot by Ritsumeikan University [36]

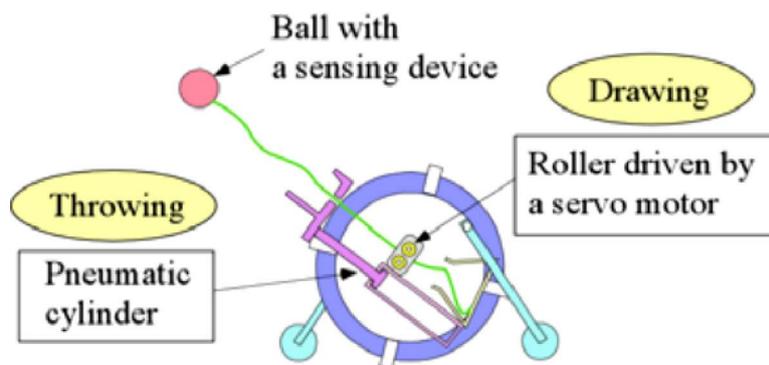


Fig. 1-10 Throw and collect type inspector developed by Tokyo Institute of Technology [37]

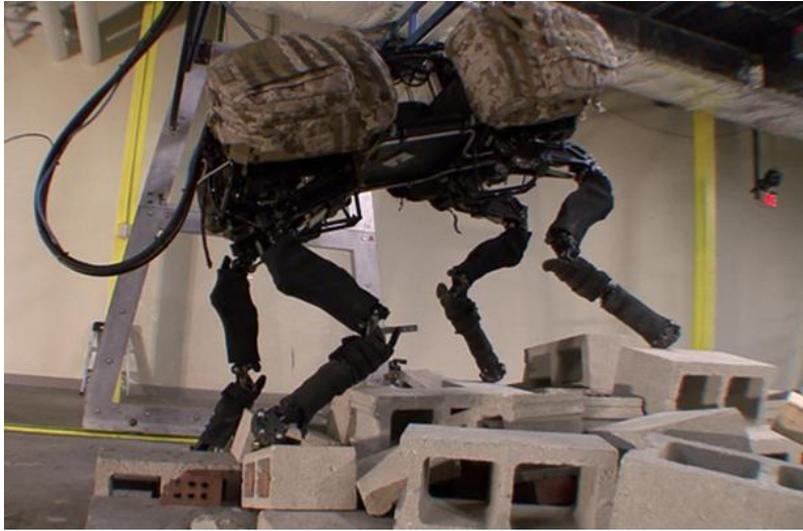


Fig. 1-11 “BigDog” developed by Boston Dynamics [38]



Fig. 1-12 “AirHopper” developed by Tokyo Institute of Technology [39]



Fig. 1-13 Artificial finger developed by Tokai University [52]

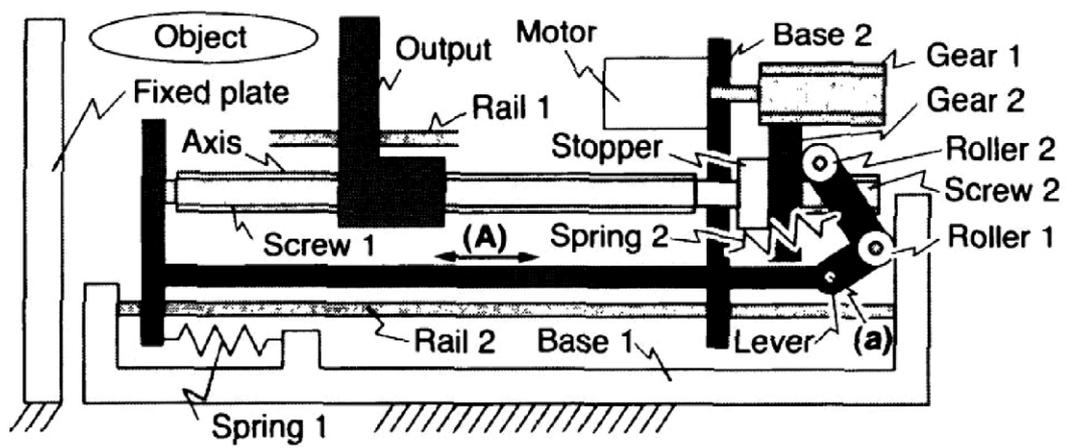


Fig. 1-14 Linear mechanism developed by Tokyo Institute of Technology [53]

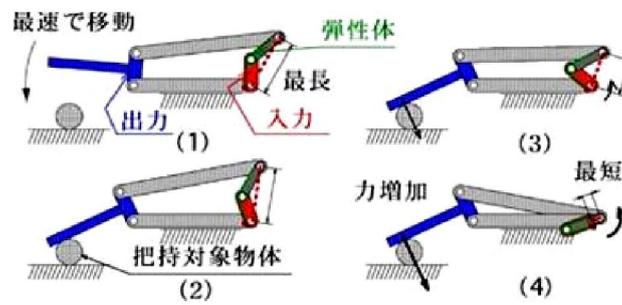


Fig. 1-15 Robot hand developed by Tokyo Institute of Technology [55][56]

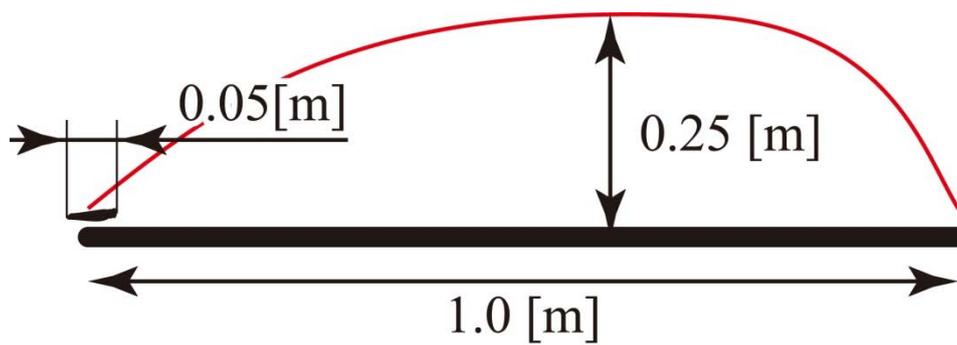


Fig. 1-16 Jumping performance of locusts

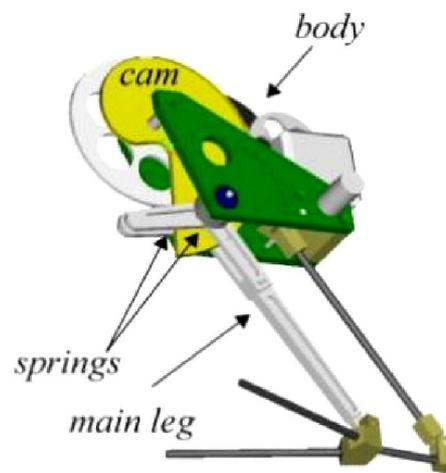


Fig. 1-17 Joint mechanism developed by Lausanne [66][67]

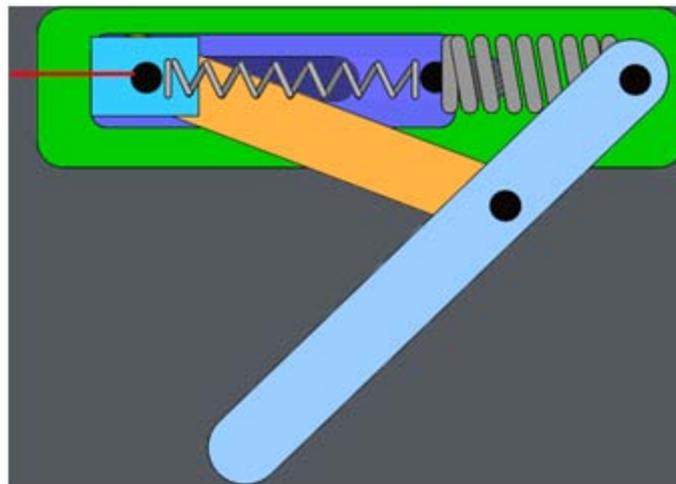


Fig. 1-18 Joint mechanism developed by Kogakuin University [68][69]

第2章

跳躍ロボットの設計指針

第2章 跳躍ロボットの設計指針

2.1 はじめに

跳躍運動を実現するためには高出力なアクチュエータが必要であるが，アクチュエータ自体の質量が大きいと跳躍に必要な力が増加する．アクチュエータの選定を行う際には質量も考慮する必要がある．したがって，関節機構は力，速度，質量の3つの観点から評価する必要がある．本研究では，式(2-1)に示されるような出力質量比 \bar{W} [W/kg]を用いて，アクチュエータと関節機構を評価する．式(2-1)中の F [N]は出力される力， v [m/s]は速度， m [kg]は質量を表す．

$$\bar{W} = \frac{Fv}{m} \quad (2-1)$$

Fig.2-1 に様々なアクチュエータの出力質量比を示す[2-1]．Fig.2-1 に示されるように，同一種類のアクチュエータの出力質量比はほぼ一定である[70]．

本章では，目標の跳躍性能を持つロボットを作るために最低限必要な関節機構の出力質量比 \bar{W}_{\min} [W/kg]を推定する．2.2 節では跳躍運動に影響及ぼす変数に対して無次元解析を行い， \bar{W}_{\min} を推定するために必要な無次元パラメータを導出する．2.3 節では， \bar{W}_{\min} を無次元パラメータの関数として表す．また，強度と跳躍効率の観点から【～と～を意味する】無次元パラメータを求める．無次元パラメータを用いることで，ロボットの大きさと質量に依存しないパラメータで変数を表すことができる[71]．2.4 節では，設定した脚長と質量を持つ跳躍ロボットが目標の跳躍性能を得るために必要な \bar{W}_{\min} を推定し，その \bar{W}_{\min} が一般的なモータで実現可能かどうか検討する[72-76]．

2.2 無次元パラメータの導出

2.2.1 跳躍ロボットのモデル

跳躍ロボットは Fig.2-2 で示されるように胴体部の質量 m_b 、胴体部を支えるための構造部材の質量 m_{fra} 、及び跳躍力を発生させる関節機構の質量 m_{act} を持ち、全質量が M で表されるモデルとして解析を行う。なお、跳躍運動の解析時には、モデルを m_b 、 m_{fra} 、 m_{act} の3つの質量で表された2質点系として考える。Fig.2-3 に2質点モデルの跳躍運動を示す。跳躍運動開始時において、ロボットの胴体部は加速距離 l_{acc} の間、跳躍力 F_{jum} により加速し、 v_{acc} の速度を得たとする。この加速運動において加速される質量は m_b のみである。その後、 m_b が持つ運動エネルギーが脚部にも伝達し、ロボット全体が速度 v_{jum} を得る。 v_{jum} はロボットが上空に射出される時の初期速度であり、ロボットは v_{jum} によって h の高さまで跳躍する。

2.2.2 無次元解析

Fig.2-3 のような跳躍運動において、ロボットの跳躍に関与する独立した変数は重力加速度 g を含めた m_b 、 m_{fra} 、 M 、 l_{acc} 、 h 、 g の6つとする。 F_{jum} 、 v_{acc} 、 v_{jum} はその他の変数から算出可能であるため、上記の変数群から除外する。6つの独立した変数に含まれる基本単位は、質量[kg]、長さ[m]、時間[s]の3つである。したがって、跳躍運動に関する無次元パラメータは、Buckingham の Π 定理より3つ (=6-3) 存在する[77]。ここで、3つの無次元パラメータを導出するために、次式に示すような無次元パラメータを仮定する。

$$m_b^{n_1} m_{fra}^{n_2} M^{n_3} l_{acc}^{n_4} h^{n_5} g^{n_6} = \text{non-dimension} \quad (2-2)$$

式 (2-2) が無次元であるためには、各基本単位[kg]、[m]、[s]の含有量の総和がゼロでなければならない。したがって、乗数 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 、 n_5 、 n_6 は以下の制約条件を持つ。

$$\begin{cases} n_1 + n_2 + n_3 = 0 & (2-3) \\ n_4 + n_5 = 0 & (2-4) \end{cases}$$

$$n_6 = 0 \quad (2-5)$$

式 (2-3) を n_3 、式 (2-4) を n_4 について解くと

$$\begin{cases} n_3 = -n_1 - n_2 & (2-6) \\ n_4 = -n_5 & (2-7) \end{cases}$$

となる。式 (2-6)、(2-7)を式 (2-2) に代入し、整理すると

$$\left(\frac{m_b}{M}\right)^{n_1} \left(\frac{m_{fra}}{M}\right)^{n_2} \left(\frac{h}{l_{acc}}\right)^{n_5} \quad (2-8)$$

となり, 3つの無次元パラメータを得る. 下記に次元解析によって得られた無次元パラメータを示す.

$$\hat{J} = \frac{h}{l_{acc}} \quad (2-9)$$

$$\hat{m} = \frac{m_b}{M} \quad (2-10)$$

$$\hat{c} = \frac{m_{fra}}{M} \quad (2-11)$$

跳躍比 \hat{J} は単位加速距離あたりの跳躍高さを表した無次元パラメータであり, \hat{J} を用いることで脚長に依存せず跳躍高さを評価することが可能である[78]. 本研究では, \hat{J} をロボットの目標の跳躍性能を表す指標として用いる. 質量比 \hat{m} は全質量に対する胴体部の割合を表した無次元パラメータである. 加速時のロボットの挙動は m_b に依存し, 胴体部の運動エネルギーが脚部に伝達する過程における速度の低下は m_b と m_l の比率に依存するため, \hat{m} はロボットの跳躍効率を表すパラメータとして考えることができる. 跳躍比 \hat{c} は全質量と構造部材の質量の割合を表し, 脚部の強度に関与する無次元パラメータである. 各部の質量を \hat{m} , \hat{c} を用いると次のように表すことができる.

$$m_b = M\hat{m} \quad (2-12)$$

$$m_{fra} = M\hat{c} \quad (2-13)$$

$$m_{act} = M(1 - \hat{m} - \hat{c}) \quad (2-14)$$

2.3 跳躍ロボットの解析

2.3.1 出力質量比の導出

全質量が M 、脚長が l の跳躍ロボットが目標の \hat{J} を得るために、関節機構に最低限必要とされる出力質量比 \bar{w}_{\min} について考える。加速時において胴体部は l_{acc} の間、一定の F_{jum} によって加速されたとするならば、 v_{acc} は次式のように与えられる。

$$v_{acc} = \sqrt{\frac{2l_{acc}(F_{jum} - m_b g)}{m_b}} \quad (2-15)$$

また、跳躍直前にロボットが持つ運動エネルギーが全て跳躍運動に変換されると仮定し、 v_{jum} は h を用いて次式のように与えられる。

$$v_{jum} = \sqrt{2gh} \quad (2-16)$$

2 質点跳躍モデルにおいて、胴体部が持つ運動エネルギーが脚部に伝達される時の運動は、非弾性衝突時の運動と等価であり、伝達の前後で運動エネルギーは変化するが運動量は保存される[79]。ここで、 v_{acc} と v_{jum} の間には、運動量保存側より導出される以下の関係式が存在する。

$$v_{jum} = \frac{m_b}{M} v_{acc} \quad (2-17)$$

式 (2-17) に式 (2-15)、(2-16) を代入し、 F_{jum} について解くことで次式を得る。

$$F_{jum} = \frac{g(M^2 h + m_b^2 l_{acc})}{m_b l_{acc}} v_{acc} \quad (2-18)$$

上式は関節機構に最低限必要な力を表している。出力質量比は式 (2-1) によって定義されており、式 (2-1) に式 (2-15)、(2-18) を代入することで \bar{w}_{\min} を求められる。

$$\bar{w}_{\min} = \frac{\sqrt{2g^3 h}(M^3 h + M m_b^2 l_{acc})}{m_b^2 m_{act} l_{acc}} \quad (2-19)$$

式 (2-19) を式 (2-9) ~ (2-11) の無次元パラメータで整理すると

$$\bar{w}_{\min} = \sqrt{2g^3 l_{acc}} \frac{\sqrt{\hat{J}}(\hat{J} + m)}{\hat{m}^2(1 - \hat{m} - \hat{c})} \quad (2-20)$$

となる．設計者によってロボットの脚長 l (l_{acc})，目標の跳躍比 \hat{J} が与えられたならば，二つの質量比 \hat{c} ， \hat{m} を求めることで，式 (2-20) より \bar{W}_{min} は推定される．本研究では， \hat{c} を脚部の強度の観点から， \hat{m} をエネルギーの伝達効率の観点から導出する．

2.3.2 脚部の強度に関する質量比の導出

ロボットが跳躍，または着地した際に圧縮荷重 P が脚部に作用したとする．脚部の形状は Fig.2-4 で示されるような直径 d ，長さ l の円柱体であると仮定し， m_{fra} は次式で与えられる．

$$m_{fra} = \pi l d^2 \rho_{fra} \quad (2-21)$$

ρ_{fra} は構造部材の密度である．ここで，座屈変形を引き起こさないために脚部が許容できる最大の座屈応力 P_{buc} は，オイラーの座屈荷重の式より，次のように与えられる[80]．

$$P_{buc} = \frac{n\pi^3 E d^4}{64 l^2} \quad (2-22)$$

n ， E は，それぞれ端末条件係数，構造部材のヤング率である．もし， P が $P > P_{buc}$ であるならば座屈変形が生じ， $P < P_{buc}$ であるならば座屈変形は発生しない． P を M の k_{im} 倍と仮定すれば， d は式 (2-13)，(2-21)，(2-22) から導出される下記の条件を満足する必要がある．

$$d \geq \sqrt{\frac{l^3 D_1}{\hat{c}}} \quad (2-23)$$

$$D_1 = \frac{64 k_{im} \rho_{fra} g}{n \pi^2} \quad (2-24)$$

k_{im} ($>> 1$) は安全率を考慮して設計者によって決定される．したがって，跳躍または着地時に発生する P によって座屈変形しないために最低限必要な \hat{c} は下記の式で表される．

$$\hat{c} = \sqrt{\frac{l^4 D_2}{M}} \quad (2-25)$$

$$D_2 = \frac{64 k_{im} \rho_{fra}^2 g}{n \pi g} \quad (2-26)$$

式 (2-24)，(2-26) で表される D_1 ， D_2 は構造部材の材質等によって決定される定数である．つまり，設計者がロボットの脚長と全重量を決定したならば， \hat{c} は一意に求められる．

2.3.3 エネルギー伝達効率に関する質量比の最適化

Fig.2-5 に各 \hat{J} , \hat{c} に対する, \hat{m} を変化させた場合の \bar{W}_{\min} を示す. Fig.2-5 より, \bar{W}_{\min} を最小とするような \hat{m} が存在している. また, 最小値をとる \hat{m} は \hat{J} , \hat{c} の値によって変化する. 推定される \bar{W}_{\min} が小さいほど低出力なモータで目標の \hat{J} を得ることができるため, 最小値をとる \hat{m} を最適解とする. 本研究では, 各 \hat{J} , \hat{c} に対する最適な \hat{m} を式 (2-27) で表される最急降下法を用いて求めた. 最急降下法を用いた数値解析により, 極値を求められる.

$$d\hat{m} = -\eta \frac{\partial \bar{W}_{\min}}{\partial \hat{m}} \quad (2-27)$$

η は勾配係数であり, 式 (2-27) は数値解析的に最適値を求める際の \hat{m} の更新量を表す. 各 \hat{J} , \hat{c} に対する最適な \hat{m} を Fig.2-6 に示す. \hat{J} が増加すると最適値 \bar{W}_{\min} をとる \hat{m} が大きくなり, \hat{c} が増加すると最適値 \bar{W}_{\min} をとる \hat{m} が小さくなる傾向がみられる. 目標跳躍高さ (\hat{J}) は設計者によって与えられる値であり, \hat{c} はロボットの剛性の観点から設定されるため, Fig.2-6 の結果より最適な \hat{m} が得られる.

2.4 跳躍ロボットの設計例

2.4.1 最低限必要な出力質量比の推定

下記に本研究における \bar{W}_{\min} の推定手順を示す.

- ① 設計者がロボットの全質量 M , 脚長 l (l_{acc}), 目標の \hat{J} を設定する
- ② 構造部材の強度の観点から \hat{c} を求める (式 (2-24), (2-25) を使用)
- ③ 跳躍効率の観点から \hat{m} を求める (Fig.2-6 を使用)
- ④ 式 (2-19) を用いて, \bar{W}_{\min} を推定する

本推定法を用いて, $l=0.5[\text{m}]$, $M=0.1\sim 10[\text{kg}]$ である跳躍ロボットが $\hat{J}=1.0$ を実現するために必要な関節機構の \bar{W}_{\min} の推定を行った. 推定する際に使用した設計パラメータを Table 1 に示す. 脚部の構造部材はアルミニウム, 座屈荷重が加わる際の端末条件は一端固定他端自由端と仮定する.

Fig.2-7 に推定の過程で得られた \hat{c} 及び \hat{m} , Figs.2-8,9 に M に対する各質量の質量分布を示す. Fig.2-7~2-9 から, M が小さいほど構造部材の質量 m_{fra} が占める割合が大きく, アクチュエータの質量 m_{act} , 及び胴体の質量 m_b が占める割合が小さい. 逆に, M が大きいほど m_{fra} , m_{act} が占める割合が小さく, m_{act} が占める割合は大きくなる. この結果は, 質量が大きいロボットは自身を支える構造部材の割合が減少し, ペイロードを増やせることを意味している. Fig.2-10 に m_{act} に対する \bar{W}_{\min} を示す. m_{act} が小さいほど関節機構には大きな \bar{W}_{\min} が必要になる. 本推定法によると, $M=0.1[\text{kg}]$, $l=0.5[\text{m}]$ のロボットが $\hat{J}=1.0$ の跳躍性能を得るには質量比を $\hat{c}=0.73$, $\hat{m}=0.18$ に設定し, $\bar{W}_{\min}=10000[\text{W/kg}]$ 以上の関節機構を使用する必要がある. また, $M=1.0[\text{kg}]$ のロボットは質量比を $\hat{c}=0.33$, $\hat{m}=0.42$ に設定し $\bar{W}_{\min}=800[\text{W/kg}]$ 以上の関節機構を使用, $M=10[\text{kg}]$ のロボットは質量比を $\hat{c}=0.10$, $\hat{m}=0.54$ に設定し $\bar{W}_{\min}=380[\text{W/kg}]$ 以上の関節機構を使用しなければならない.

ここで, 推定した \bar{W}_{\min} が実現可能か検討するため, 市販されているモータの出力質量比について考える. 在来のもータは高速回転時に最高効率を得るように設計されているため, ロボットのアクチュエータとして利用するためには, 減速が必要不可欠である. 本研究では, モータの回転数が $200[\text{rpm}]$ 以下になるようにギヤを選定し, モータの出力をギヤ付きのモータの質量で割った値をモータの出力質量比とした. Maxon motor 社と Faulhaber 社のモータの性能を Table 2, 3, 出力質量比を Fig.2-11 に示す[81-82]. これらのモータの出力質量比は質量に対して大きく変化せず, 最大値が約 $180[\text{W/kg}]$ であった. 跳躍ロボットが目標の \hat{J} を得るには, 推定した \bar{W}_{\min} 以上の出力質量比を持つアクチュエータが必要であるため, 単に市販されているモータを関節機構に組み込んだだけでは目標の \hat{J} を実現することはできない. したがって, エネルギーを蓄積・解放する機構を関節機構に取り入れ, 出力質量比が $180[\text{W/kg}]$ 程度のモータで $380[\text{W/kg}]$ 以上の出力質量比を実現する必要がある. 次節にエネルギー蓄積機構を有した関節機構に必要なモータの出力質量比の推定について述べる.

2.4.2 バネ機構を有したロボットに必要な出力質量比の推定

エネルギー蓄積機構の有効性を検証するため、Fig.2-12 に示されるようなエネルギー蓄積機構を有するロボットのモデルについて考え、前節と同様に必要なモータの \bar{W}_{\min} を推定する。モデルの関節機構内部にはモータとバネが搭載されており、モータはバネに対してのみ仕事をを行い、 l_{acc} の間バネに蓄えられたエネルギーを用いて胴体部が加速し、ロボットが跳躍する。バネによる加速の終了時において、次式のエネルギーの釣り合いが成り立つ。

$$m_b g l_{acc} + \frac{1}{2} m_b v_{acc}^2 = \frac{1}{2} k_{sp} l_{acc}^2 \quad (2-27)$$

k_{sp} は関節機構内部にあるバネのバネ定数である。跳躍するために必要な k_{sp} は式 (2-27) を k_{sp} について解くことで求められる。

$$k_{sp} = \frac{m_b(2gl_{acc} + v_{acc}^2)}{l_{acc}^2} \quad (2-28)$$

バネ定数が式 (2-28) で表されるバネを l_{acc} だけ変位させるために必要なモータの力 F_{ch} は、フックの法則より次式で表される。

$$F_{ch} = k_{sp} l_{acc} = \frac{m_b(2gl_{acc} + v_{acc}^2)}{l_{acc}} \quad (2-29)$$

モータが F_{ch} の力でバネにエネルギーを蓄えるときの速度を v_{ch} としたとき、モータに必要な \bar{W}_{\min} は次のように定義される。

$$\bar{W}_{\min} = \frac{F_{ch} v_{ch}}{m_{act}} \quad (2-30)$$

m_{act} はモータの質量である。したがって、バネ機構を有したモデルに必要なモータの \bar{W}_{\min} は、式 (2-30) に式 (2-13)、(2-29) を代入することで求められる。

$$\bar{W}_{\min} = 2g v_{ch} \frac{\hat{m}^2 + \hat{J}}{\hat{m}(1 - \hat{m} - \hat{c})} \quad (2-31)$$

前節の設計パラメータを用い、1秒間でバネに力を蓄えたと仮定すると $v_{ch} = l_{acc}/1.0 = 0.5$ [m/s] となる。バネ機構を有したモデルに必要なモータの \bar{W}_{\min} を推定した結果を Fig.2-13 を示す。Fig.2-13 より、関節機構にエネルギー蓄積機構を導入することで必要な \bar{W}_{\min} を減少し、市販のモータで $\hat{J} = 1.0$ を達成可能である。Fig.2-14 に $v_{ch} = 0.05, 0.50, 1.00$ [m/s] と設定した場合の \bar{W}_{\min} を示す。 \bar{W}_{\min} は v_{acc} に依存し、 $v_{acc} = 1.0$ [m/s] では市販のモータで $\hat{J} = 1.0$ を実現できない。以上の結果より、加速距離 $l_{acc} = 0.5$ [m] を1秒間でバネを圧縮する機構を搭載した場合、 $M = 0.2 \sim 10$ [kg] の範囲の質量を有するロボットで目標の $\hat{J} = 1.0$ を達成する。

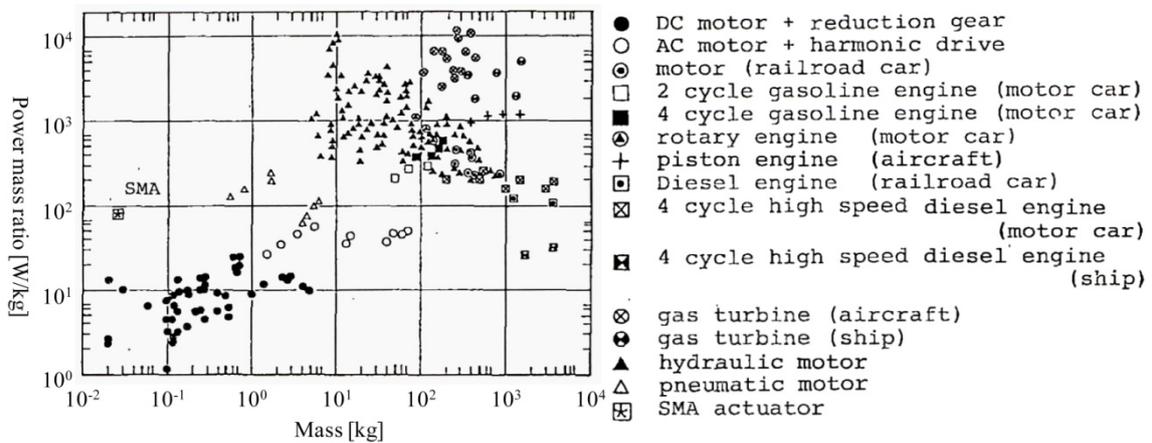


Fig. 2-1 Power mass ratio of actuators [29]

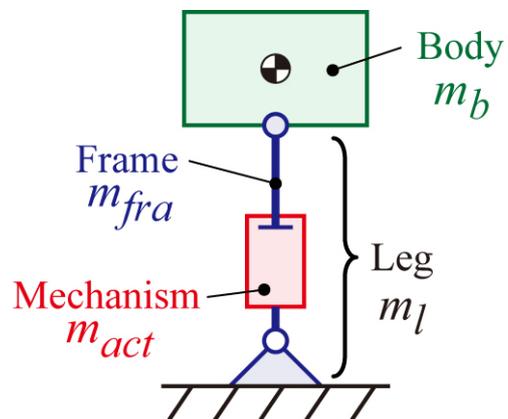


Fig. 2-2 Model of jumping robot

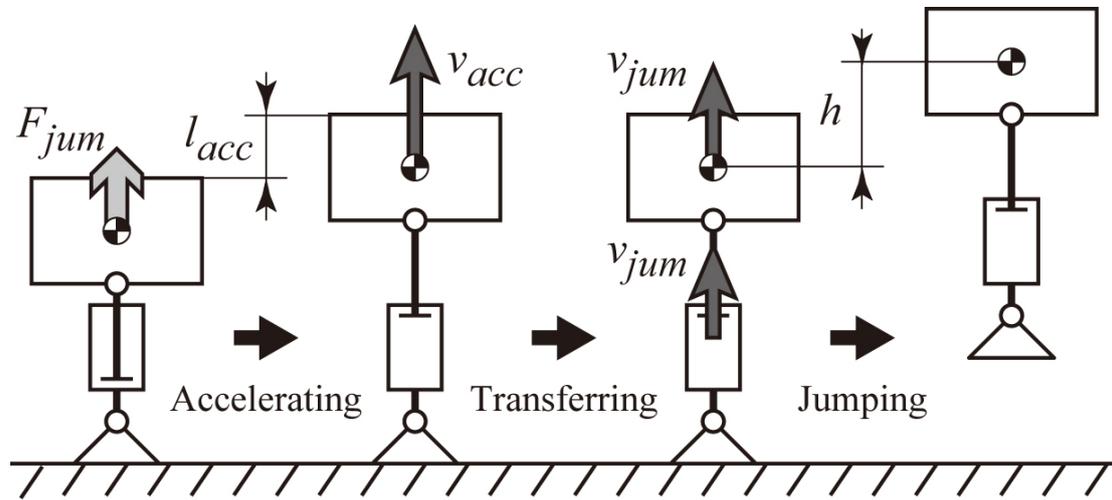


Fig. 2-3 Jumping motion in two-mass jumping system

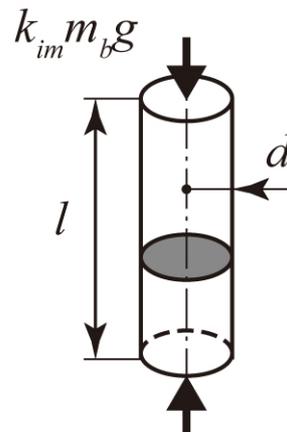


Fig. 2-4 Model of Leg

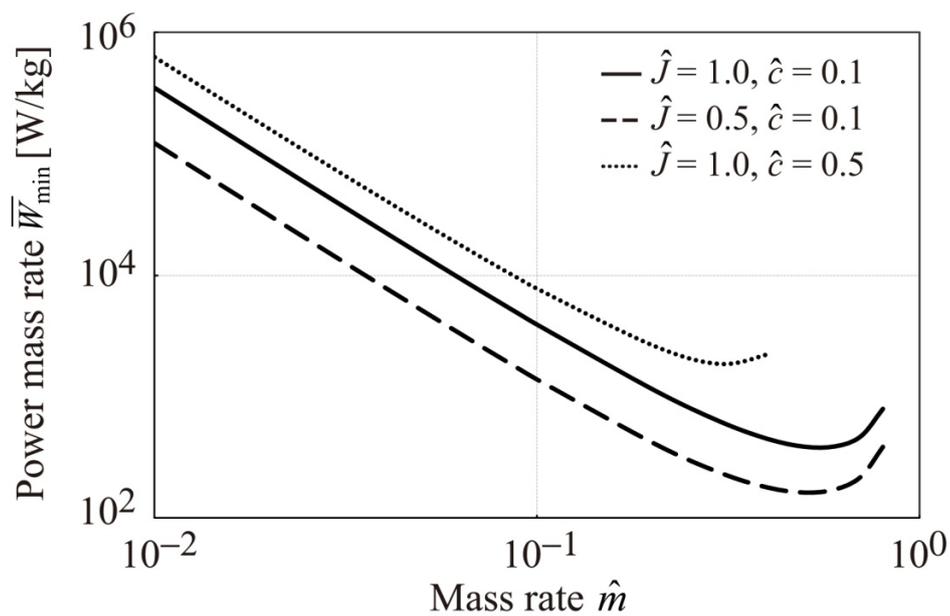


Fig. 2-5 \bar{W}_{\min} vs. \hat{m} under \hat{J} and \hat{c} is constant

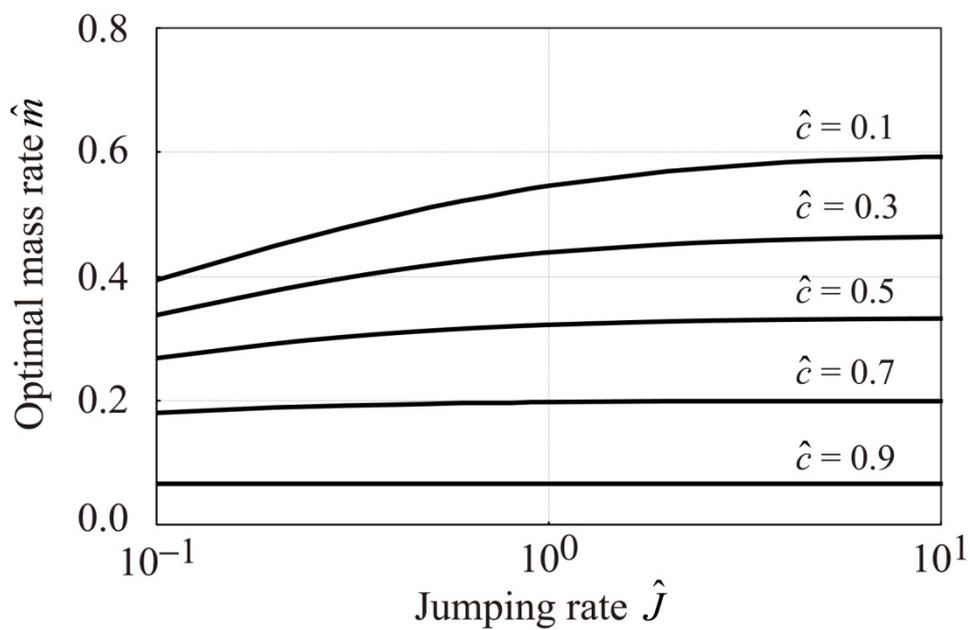


Fig. 2-6 Optimal \hat{m} vs. \hat{J} and \hat{c}

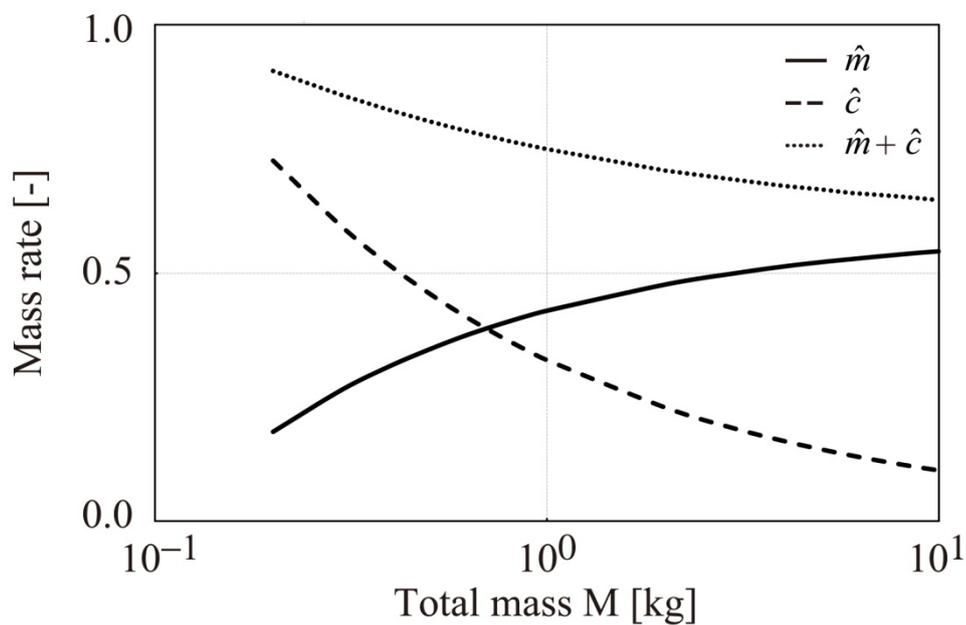


Fig. 2-7 Mass rate vs. M

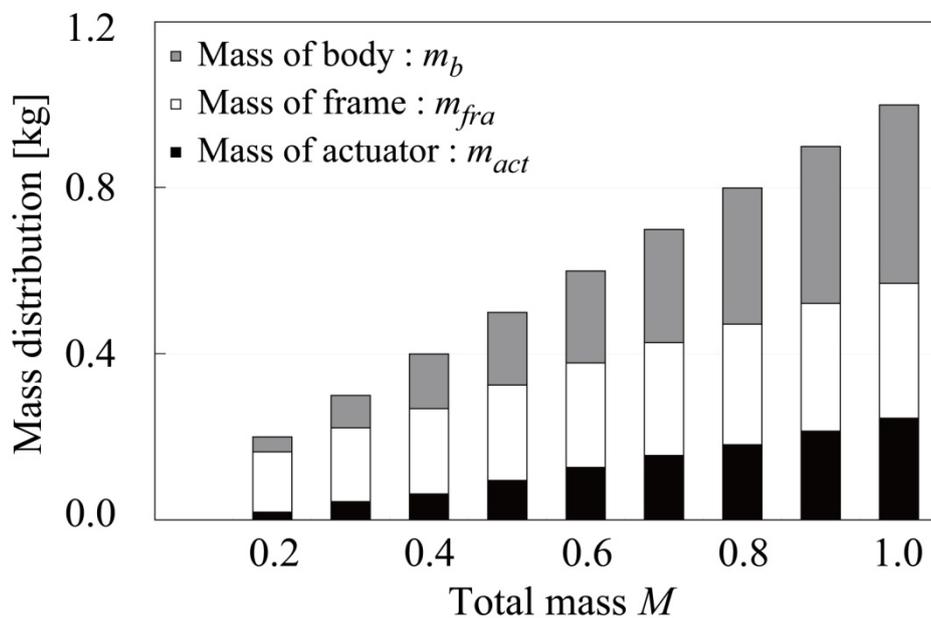


Fig. 2-8 Each mass under $M=0.1-1.0$ [kg]

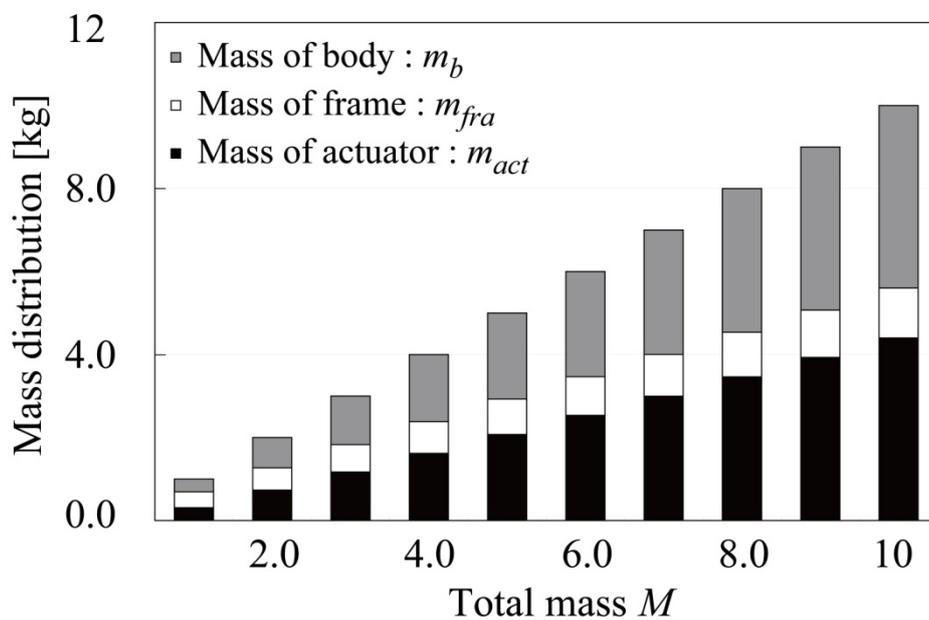


Fig. 2-9 Each mass under $M=1.0-10$ [kg]

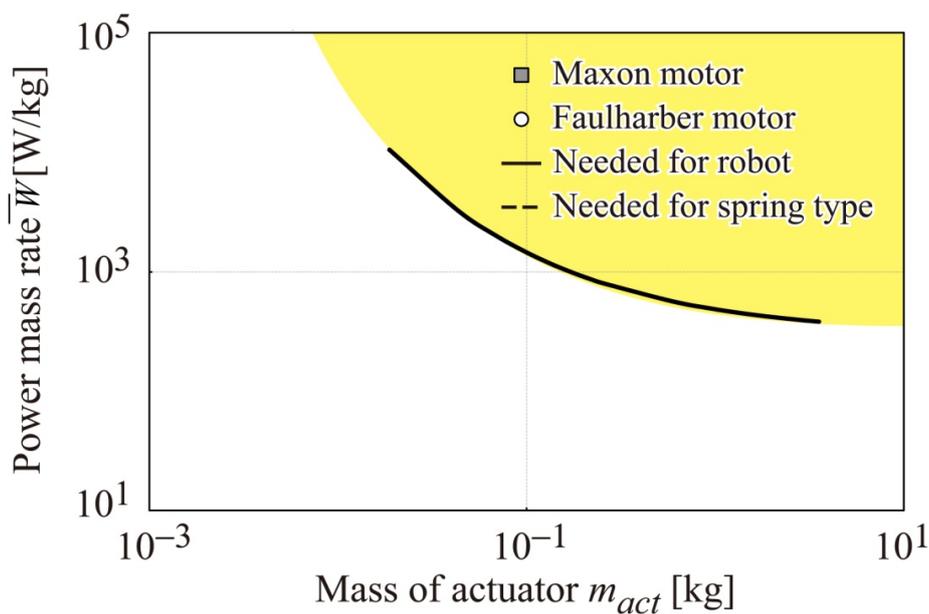


Fig. 2-10 Estimated \bar{W}_{min} needed for joint mechanism

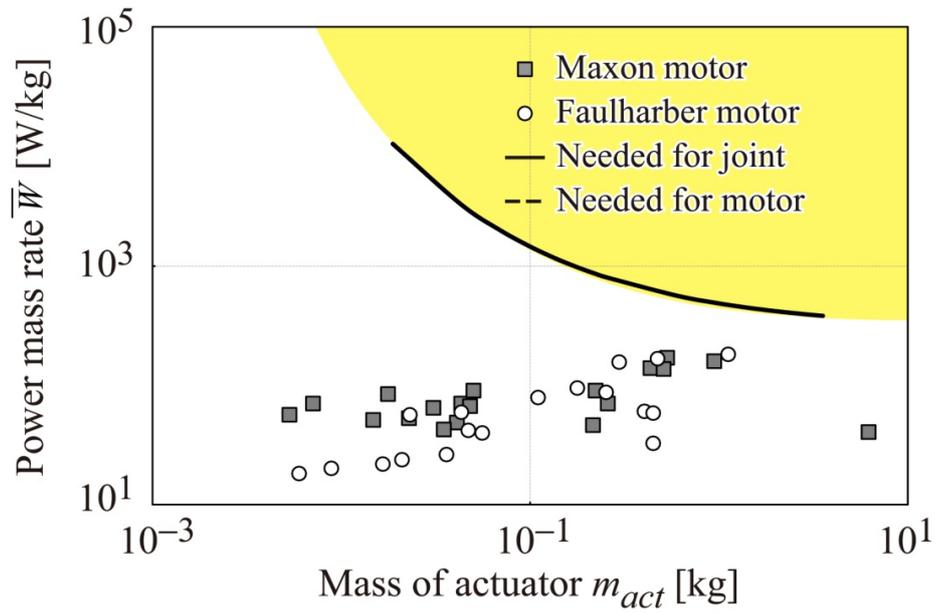


Fig. 2-11 Power mass ratio of general motor

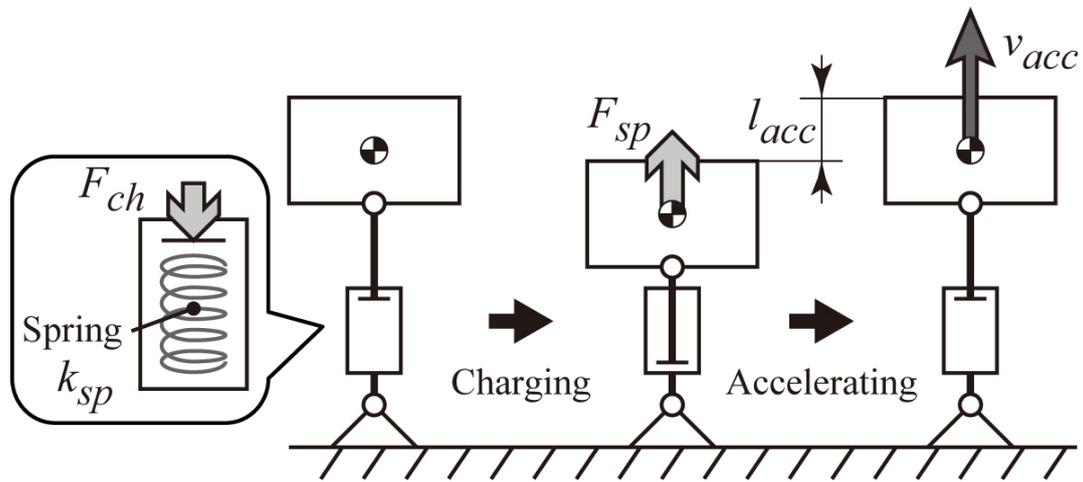


Fig. 2-12 Jumping motion in robot with spring

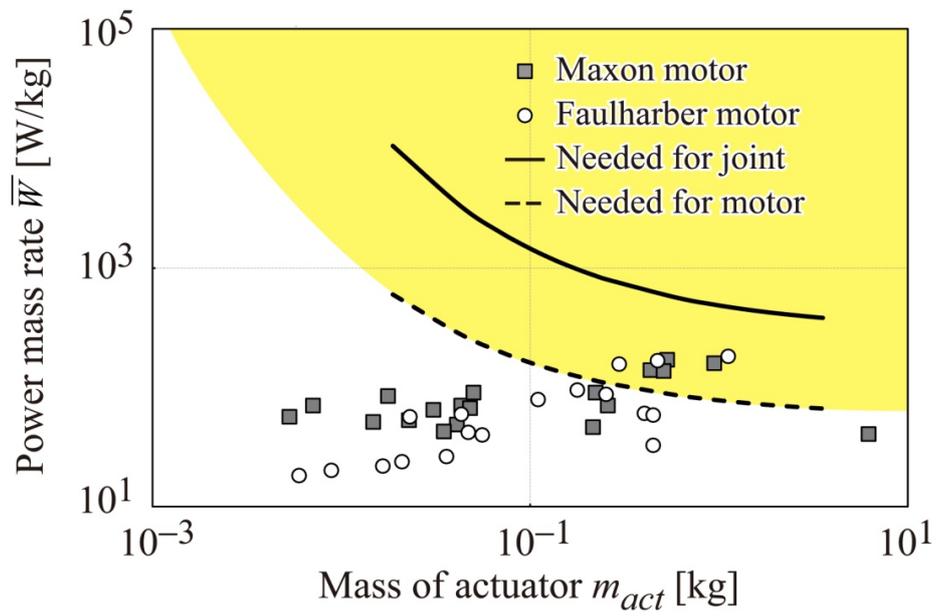


Fig. 2-13 Estimated \bar{W}_{min} needed for motor

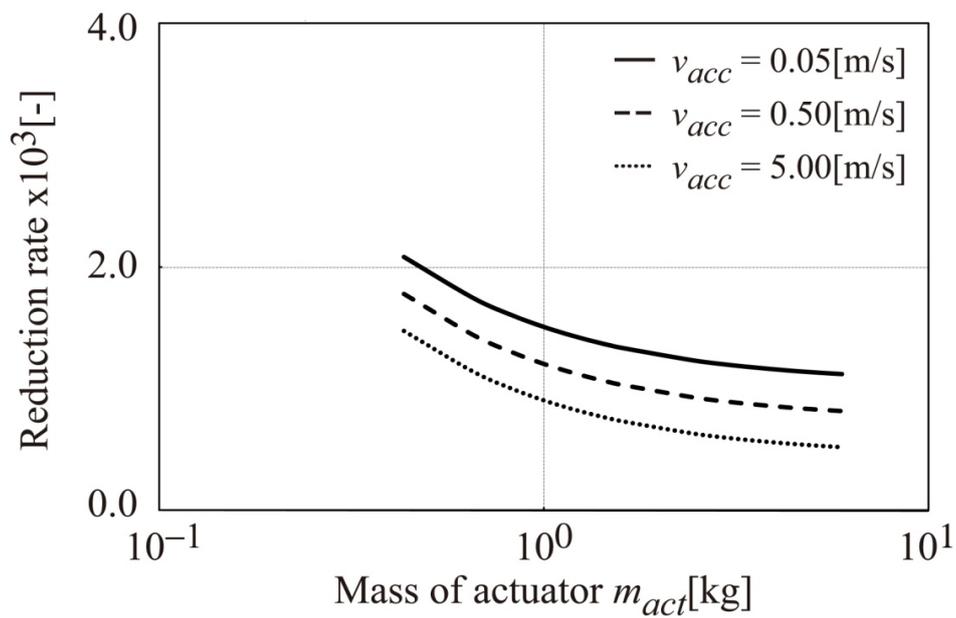


Fig. 2-14 \bar{W}_{min} depend on v_{acc}

Table 2-1 Design parameters

k_{lim}	n	ρ_{fra}	E
[-]	[-]	[kg/m ³]	[N/m ²]
20	0.25	2700	6.9x10 ¹⁰

Table 2-2 Specification of motor with gear in Maxon Company [81]

Model number	Power	Voltage	Revolution	Torque	Weight	Power mass ratio
	[W]	[V]	[rpm]	[Nm]	[g]	[W/kg]
RE6	0.3	6	83	103.0	3.0	56.6
RE8	0.5	12	71	204	3.0	70.4
RE10 0.75W	0.75	12	180	65.0	7.7	51.0
RE10 1.2W	1.2	12	175	176	7.7	52.9
RE10 1.5W	1.5	12	195	207	7.7	84.7
RE13 1.5W	1.5	12	185	210	17	42.9
RE13 2.0W	2.0	12	105	378	17	48.8
RE13 3.0W	3.0	12	196	744	17	69.8
RE16 2.0W	2.0	12	198	205	9.8	64.9
RE16 3.2W	3.2	12	146	611	9.8	66.9
RE16 4.5W	4.5	12	183	2190	12	89.6
RE25 10W	10	12	167	3970	86	46.3
RE25 20W	20	12	184	13800	108	89.7
RE26	18	15	196	10500	108	69.7
RE30	60	12	160	43000	194	139
RE35	90	15	139	44600	194	169
RE36	70	18	200	24100	162	137
RE40	150	12	161	72200	460	160
RE65	250	12	136	85700	3700	40.5

Table 2-3 Specification of motor with gear in Faulhaber Company [83]

Model number	Power	Voltage	Revolution	Torque	Weight	Power mass ratio
	[W]	[V]	[rpm]	[mNm]	[g]	[W/kg]
0615-s	0.11	4.5	76	5.12	4	18.3
0816-s	0.18	8	64	10.2	5.4	20.2
1016-s	0.36	12	64	7.68	10	21.8
1219-s	0.5	12	63	7.68	10	23.8
1224-s	1.3	12	52	12.8	10	56.5
1319-r	0.95	12	193	8.58	24	26.4
1331-r	2.57	12	150	7.92	24	59.8
1336-c	1.98	12	136	19.1	24	42.1
1727-c	2.25	12	181	15.1	28	40.2
2232-se	8.7	12	165	12.0	48	79.1
2342-cr	17	12	188	43.0	90	95.5
2642-cr	22.1	12	149	86.0	139	87.4
2657-cr	45.9	12	147	86.0	139	156
3242-cr	24.7	12	121	206	230	61.0
3257-cr	79.2	12	133	211	230	168
3557-c	14.5	12	112	90.3	171	32.5
3557-cs	26.1	12	126	112	171	58.5
3863-c	204	12	56	899	720	182

第3章

バッタの跳躍機構

第3章 バッタの跳躍機構

3.1 はじめに

筋肉の動作においても，アクチュエータの性質と同様に最大の力を発生する場合はゆっくりと動作し，小さい力で動作可能な場合は俊敏に動作する．大きな力と高速の両方を同時に実現するには弾性要素にエネルギーを蓄積する機構が必要であり，高い跳躍性能を持つバッタはエネルギー蓄積機構を有すると考えられる．本章では，力学的な視点からバッタの後脚を解析し，バッタの跳躍機構の特徴を述べる．次に，バッタが有する筋肉（アクチュエータ）単体の出力とバッタの跳躍能力を比較検証する．

3.2 節では，バッタの後脚内部にある各部位の機能について述べる．3.3 節ではバッタの跳躍機構をモデリングし，外積から導出されるヤコビ行列を用いて出力特性を解析する．

3.4 節では 3.3 節で得られた跳躍機構モデルを用いて出力特性のシミュレーション結果を示す[83-87]．

3.2 バッタの跳躍メカニズム

3.2.1 バッタの脚構造

バッタの後脚は全脚中で最も大きく、バッタによっては全長 40[mm]にも達する (Fig.3-1 参照)。後脚は、腿節、脛節、足根の 3 つの部位で構成されている。腿節内部には脛節を伸長させるための伸筋、脛節を屈曲させるための屈筋があり、大部分を伸筋が占める (Fig.3-2 参照)。一般的に筋肉が発生できる収縮力は筋肉の断面積に比例するため、屈筋と比較して伸筋は高い収縮力を発生する。また、足根には鋭い爪が存在し、地面を蹴る際に足が滑ることを防ぐ働きがある。バッタの膝関節部を拡大した写真を Fig.3-3 に示す。バッタの膝関節部の特徴の一つが半月突起と呼ばれるレジリンで構成された外骨格である。半月突起は他の外骨格と比較して非常に堅く、弾性体としての機能を持つ[88-90]。腿節と脛節は半月突起のみで連結されている。Fig.3-4 に示されるように脛節を動作させるための伸筋と屈筋は、腱を介して脛節に接続している。伸筋の腱が脛節に直接接続しているのに対して、下方に位置する屈筋の腱はランプと呼ばれる突起物を經由して脛節に接続している。

3.2.2 バッタの跳躍動作

バッタの跳躍動作について以下に述べる。半月突起と脛節との連結点を回転中心として、バッタは伸筋により膝関節を伸長、屈筋により屈曲させている。跳躍する前、バッタは Fig.3-4 (b) に示すように屈筋を収縮し、膝関節を完全に屈曲させる。屈曲時、半月突起には伸筋から発生する収縮力がほとんど作用しない。そのため、半月突起は湾曲せず関節の回転中心として機能する。次に、バッタは屈筋を収縮した状態のまま伸筋を収縮し、跳躍に必要なエネルギーを半月突起に蓄える (Fig.3-4 (c) 参照)。つまりバッタは、この伸筋と屈筋を共収縮させ、弾性体である半月突起にエネルギーを蓄えている。共収縮時において、屈筋より伸筋の収縮力の方が大きいため、完全に屈曲した状態を保持できず、機構に工夫がなければ力（モーメント）の釣り合いを考えると回転する。バッタの膝関節では、Fig.3-5 に示すように、ランプで屈筋の収縮力が作用する向きが変更され屈筋による回転モーメントを増加させることで、共収縮時における力の釣り合いの問題を解決している。共収縮後、バッタは屈筋を弛緩させるだけで、特別なトリガ機構を用いることなく半月突起に蓄えられたエネルギーを瞬間的に解放し、高い出力を得ることができる[88-90]。バッタは伸筋と屈筋の駆動方法により弾性体（半月突起）の使用方法を変え、跳躍と歩行動作を使い分けていると考えられる。

3.3 出力特性の解析

3.3.1 膝関節のモデリング

バッタの跳躍機構をリンク及び回転対偶として表現したモデルを Fig.3-6 に示す。Fig.3-6 において、2次元平面は腿節として考える。伸筋を伸張用の直動アクチュエータ(図の上方)、屈筋を屈曲用の直動アクチュエータ、半月突起を直動バネ、ランプをプーリ、脛節を出力リンクでモデリングした。伸長用、屈曲用アクチュエータの片端を xy 平面に固定された回転対偶、もう片端を出力リンクに固定された回転対偶に接続する。また、直動バネの片端は xy 平面、もう片端は出力リンクに固定された回転対偶に接続する。なお、直動バネは水平方向のみ駆動し、腿節は xy 平面に固定されたとして考える。バッタの跳躍機構の解析には、Fig.3-7 に示すような絶対座標系に置かれたリンクベクトルを用いる。リンクベクトルは下記に示すような仮定を持つ。

- l_b は絶対座標系の Y_G と平行である
- l_{sp} , l_{l1} は絶対座標系の X_G と平行である
- l_{sp} は l_b の垂直二等分線である
- l_e , l_{l2} の大きさは各直動アクチュエータによって変化する

3.3.2 ヤコビ行列

任意のリンクベクトル $l_i = [l_{ix} \ l_{iy} \ 0]^T$ が次式に示すような出力リンクの絶対角度 θ_o の関数で表されたとする。

$$l_i = g(\theta_o) \quad (3-1)$$

出力リンクの微小変位 $\dot{\theta}_o$ に対する l_i の微小変位ベクトル $\dot{l}_i = [\dot{l}_{ix} \ \dot{l}_{iy} \ 0]^T$ には、式 (3-1) の両辺を微分することで求めることができる。

$$\dot{l}_i = J_i(\theta_o) \dot{\theta}_o \quad (3-2)$$

ただし、

$$J_i(\theta_o) = \frac{\partial g(\theta_o)}{\partial \theta_o} \quad (3-3)$$

$J_i(\theta_o)$ は θ_o と l_i の微小変位量の間を関係を表すヤコビ行列である。本関節機構は 2 入力、1 出力のシステムであるため、関節機構の姿勢（関節角度）に対して入力一意に定まらない。このようなシステムにおいて、微分でヤコビ行列を導出することはこんなのである。本研究では微分ではなく外積を用いてヤコビ行列を導出する。

3.3.3 歩行動作時のトルクと角速度

歩行動作時にバットの跳躍機構が発生するトルクと角速度について考える．ここで，Fig.3-8 (a) に示すように，アクチュエータ a_e の速度ベクトル $\dot{\boldsymbol{l}}_e$ によって出力リンクに角速度 $\dot{\theta}_o$ が発生したとする．この時，駆動させていないアクチュエータ a_f は負荷として作用し，バネの長さベクトル \boldsymbol{l}_{sp} は変位しないと仮定する． $\dot{\theta}_o$ と $\dot{\boldsymbol{l}}_e$ の関係は外積によって次式で表される．

$$\dot{\boldsymbol{l}}_e = \boldsymbol{l}_{o1} \times \dot{\theta}_o = \boldsymbol{l}_{o1} \times \boldsymbol{e}_z \dot{\theta}_o \quad (3-4)$$

$\boldsymbol{e}_z = [0 \ 0 \ 1]^T$ は $\dot{\theta}_o = [0 \ 0 \ \dot{\theta}_o]^T$ の単位方向ベクトルである．式 (3-2) と式 (3-4) より， \boldsymbol{l}_e と θ_o の微小変位に関するヤコビ行列 \boldsymbol{J}_e は次式で与えられる．

$$\boldsymbol{J}_e = \boldsymbol{l}_{o1} \times \boldsymbol{e}_z \quad (3-5)$$

したがって， \boldsymbol{J}_e を用いると $\dot{\theta}_o$ は，次のように表される．

$$\dot{\theta}_o = \boldsymbol{J}_e^\# \dot{\boldsymbol{l}}_e \quad (3-6)$$

$\boldsymbol{J}_e^\#$ は \boldsymbol{J}_e の疑似逆行列を表す．式 (3-6) と仮想仕事の原理から伸長動作時の出力トルク T_o とアクチュエータ a_o の収縮力のベクトル $\boldsymbol{F}_e = [F_{ex} \ F_{ey} \ 0]^T$ の関係式は次式で表される．

$$T_o = \boldsymbol{J}_e^T \boldsymbol{F}_e - \tau_f \quad (3-7)$$

τ_f は受動的に動作するアクチュエータ a_f の粘性力 f_f によって発生する負荷トルクである．アクチュエータ a_f の収縮力のベクトル $\boldsymbol{F}_f = [F_{fx} \ F_{fy} \ 0]^T$ によって，出力リンクに発生する T_o と $\dot{\theta}_o$ も同様に求めることができる (Fig.3-9 参照)．

$$\dot{\theta}_o = \boldsymbol{J}_f^\# \dot{\boldsymbol{l}}_f \quad (3-8)$$

$$T_o = \boldsymbol{J}_f^T \boldsymbol{F}_f - \tau_e \quad (3-9)$$

ただし，

$$\boldsymbol{J}_f = \boldsymbol{l}_{o2} \times \boldsymbol{e}_z \quad (3-10)$$

$\dot{\boldsymbol{l}}_f = [\dot{l}_{f,x} \ \dot{l}_{f,y} \ 0]^T$ はアクチュエータの速度ベクトル， τ_e は受動的に動作するアクチュエータ a_e の粘性力 f_e によって発生する負荷トルクである．

3.3.4 跳躍動作時のトルクと角速度

跳躍動作時にバットの跳躍機構が発生するトルクと角速度について考える．Fig.3-9 (a) に示すように，膝関節が完全に屈曲した状態で 2 つのアクチュエータ a_e , a_f を共収縮させ，バネにエネルギーが蓄えられたとする．この時，直動バネには F_e しか作用しないと仮定するならば，直動バネの変位量 δ_{sp} は次の式で近似される．

$$\delta_{sp} = r_{sp} - |l_{sp}| \quad (3-11)$$

l_{sp} は直動バネの自然長である．直動バネの反発力 F_{sp} はフックの法則と式 (3-11) より求めることができる．

$$F_{sp} = k_{sp} (r_{sp} - |l_{sp}|) \quad (3-12)$$

k_{sp} は直動バネのバネ定数である．共収縮後，アクチュエータ m_f が停止し， $F_{sp} = [F_{sp,x} \ F_{sp,y} \ 0]^T$ によって出力リンクに T_o , $\dot{\theta}_o$ が発生したとする．この時，伸長用アクチュエータの粘性係数が非常に高いため， l_e の長さは変化せず，出力リンクは B 点を中心に回転すると仮定する． T_o と F_{sp} の関係式は，ヤコビ行列 G_{sp} を用いて次式で表される．

$$T_o = G_{sp}^T F_{sp} \quad (3-13)$$

$$G_{sp} = l_{o1} \times e \quad (3-14)$$

跳躍動作時の $\dot{\theta}_o$ はバネの速度は $\dot{l}_{sp} = [\dot{l}_{sp,x} \ \dot{l}_{sp,y} \ 0]^T$ はが未知であるため，伸長，屈曲動作時と同様に求めることができない．本研究では，アクチュエータ a_f の粘性係数 μ_f を用いて，跳躍動作時の $\dot{\theta}_o$ を求める．アクチュエータ m_f からの粘性力のベクトル $f_f = [f_{f,x} \ f_{f,y} \ 0]^T$ は， T_o を用いて次式で与えられる．

$$f_f = (G_f^\#)^T T_o \quad (3-15)$$

$$G_f = (l_{o1} + l_{o2}) \times e_z \quad (3-16)$$

$G_f^\#$ は G_f の疑似逆行列を表す．この時，アクチュエータ m_f の μ_f と f_f に次に示すような関係式があるとする．

$$f_f = \mu_f \dot{l}_f \quad (3-17)$$

式 (3-17) を \dot{l}_f について解くと，

$$\mathbf{i}_f = \frac{\mathbf{f}_f}{\mu_f} \quad (3-18)$$

となる. 式 (3-15) に式 (3-18) を代入すると,

$$\mathbf{i}_f = \frac{1}{\mu_f} (\mathbf{G}_f^\#)^T T_o \quad (3-19)$$

となる. したがって, 式 (3-19) より跳躍動作時の $\dot{\theta}_o$ は,

$$\dot{\theta}_o = \frac{1}{\mu_f} \mathbf{G}_f^\# (\mathbf{G}_f^\#)^T T_o \quad (3-20)$$

で表される.

3.4 出力特性のシミュレーション

本節では、3.3節で得られた解析式を用いてバッタの跳躍機構の出力特性を調べる。設定した跳躍機構のリンク長を Table 1, 使用する伸長用アクチュエータの性能を Table 2, 屈曲用アクチュエータの性能を Table 3 に示す。最大屈曲角度を $0.35[\text{rad}]$, 伸長角度を $2.79[\text{rad}]$ に設定した場合における伸長動作時の T_o , $\dot{\theta}_o$ を Fig.3-10, 屈曲動作時の T_o , $\dot{\theta}_o$ を Fig.3-11 に示す。Fig.3-10, 3-11 の横軸はバッタの関節角度, 左の縦軸はトルク, 右の縦軸は角速度を表す。伸長動作時は約 $\varphi=3.14[\text{rad}]$ で最大トルク $1.99[\text{Nm}]$, 屈曲動作時は $\varphi=0.35[\text{rad}]$ で最大のトルク $1.49[\text{Nm}]$ を得る。 $\varphi=0.35[\text{rad}]$ において伸長トルクより屈曲トルクの方が大きいため, 2つのアクチュエータの共収縮時に屈曲状態を維持することが可能である。

Fig.3-12 に跳躍動作時の T_o , $\dot{\theta}_o$, Fig.3-13 にバッタの跳躍機構の出力を示す。Fig.3-12 より, 跳躍動作時においてバッタの跳躍機構は $\varphi=0.52[\text{rad}]$ の近傍で最大トルク $0.83[\text{Nm}]$ と最大角速度 $30.6[\text{rad/s}]$ を得ることが分かった。また, 圧縮したバネが伸びきるため, 関節角度が $\varphi=1.05[\text{rad}]$ 以上はトルクが発生できない。Fig.3-13 より, バッタの跳躍機構は $\varphi=0.52[\text{rad}]$ の近傍で, 搭載している 2つのアクチュエータ (筋肉) の合計出力を大きく上回る出力 $25.3[\text{W}]$ を得られることが分かった。

シミュレーション結果より, バッタの跳躍機構は 1つの筋肉のみを稼働させることで高いトルクを伴う歩行動作が可能, 筋肉の共収縮によって蓄積したエネルギーを解放することで高い出力を伴う跳躍動作が可能であることを示した。したがって, バッタの跳躍機構を模倣することで歩行・跳躍動作が可能な関節機構が実現できると考えられる。

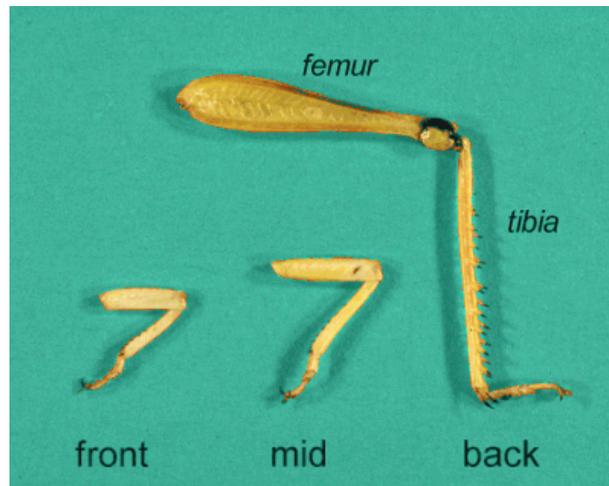


Fig. 3-1 Locust legs [62]

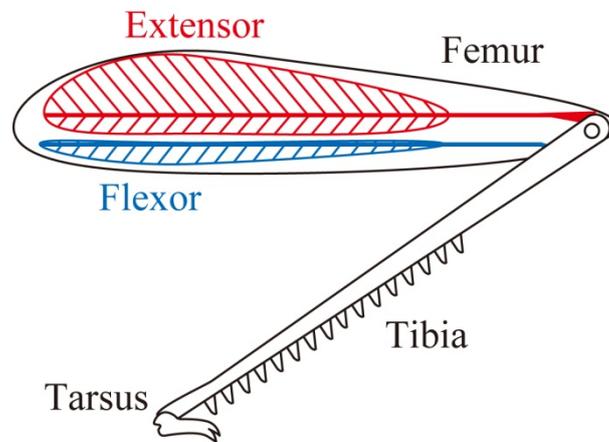


Fig. 3-2 Hind-leg of locust

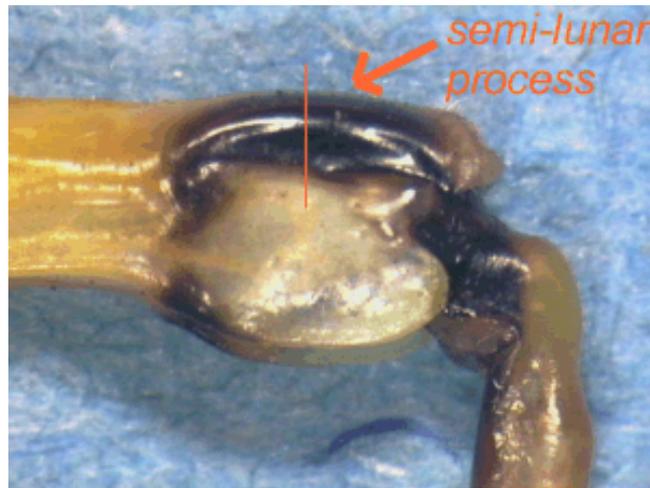


Fig. 3-3 Semi-lunar process in hind-leg [62]

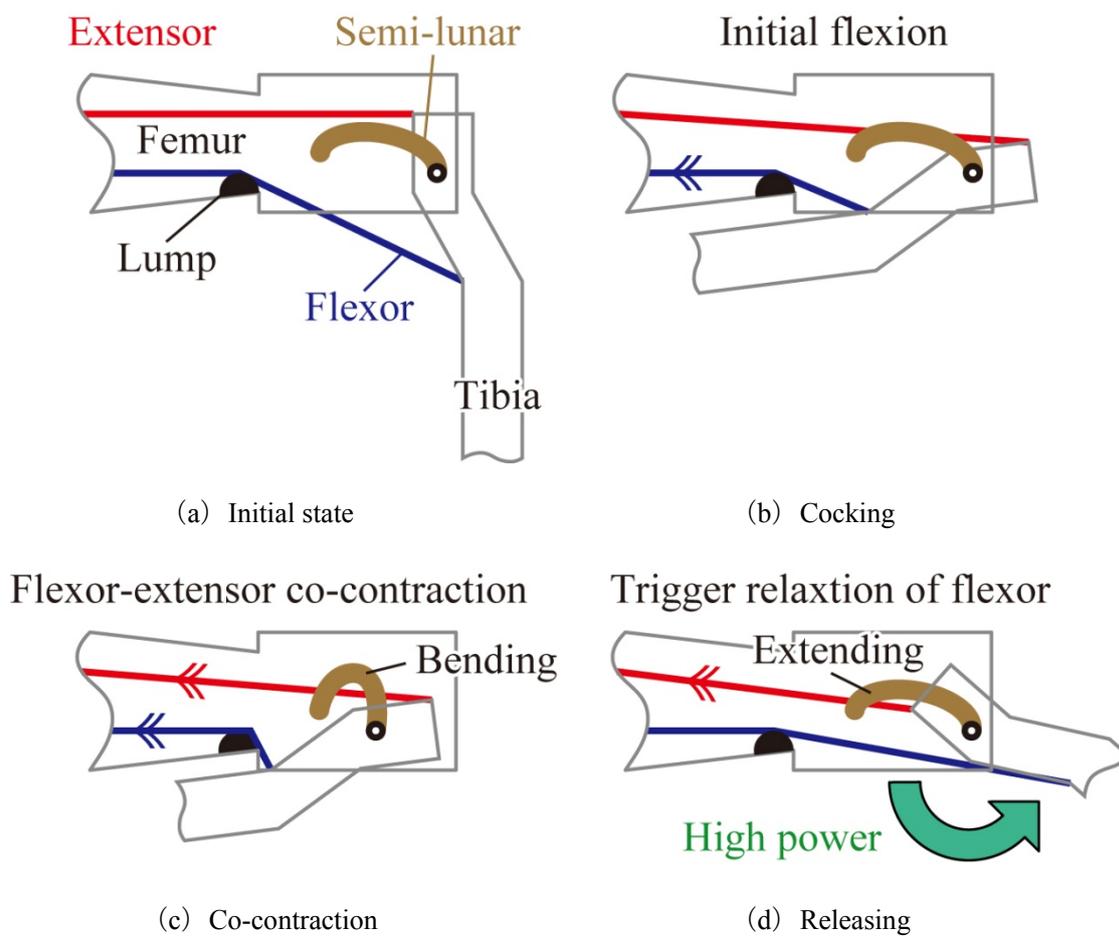


Fig. 3-4 Jumping process

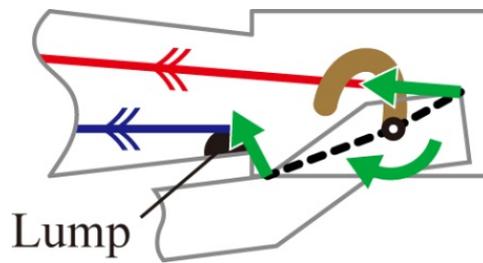


Fig. 3-5 Lump effect

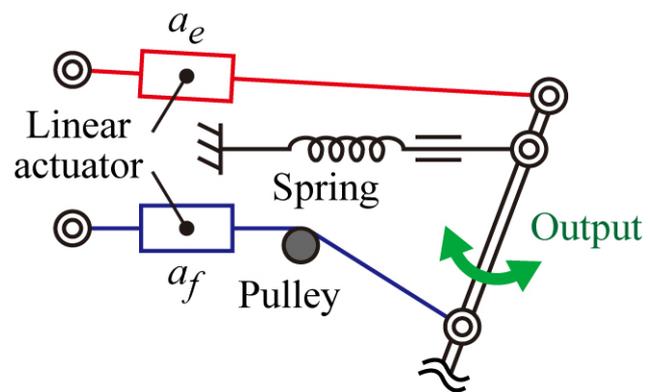


Fig. 3-6 Model of jumping mechanism of locust

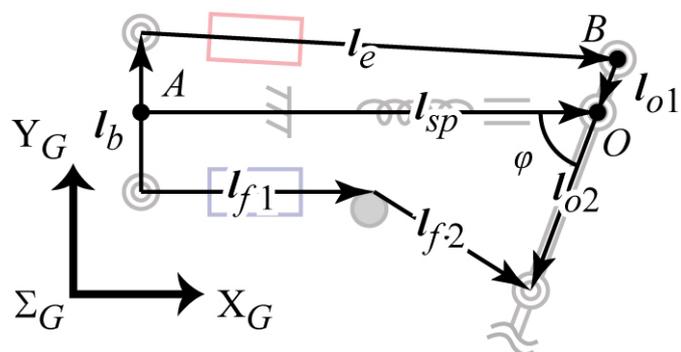
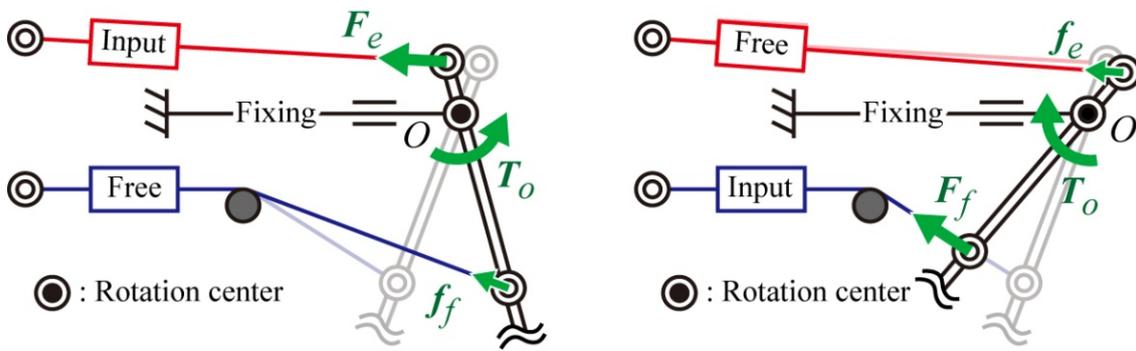


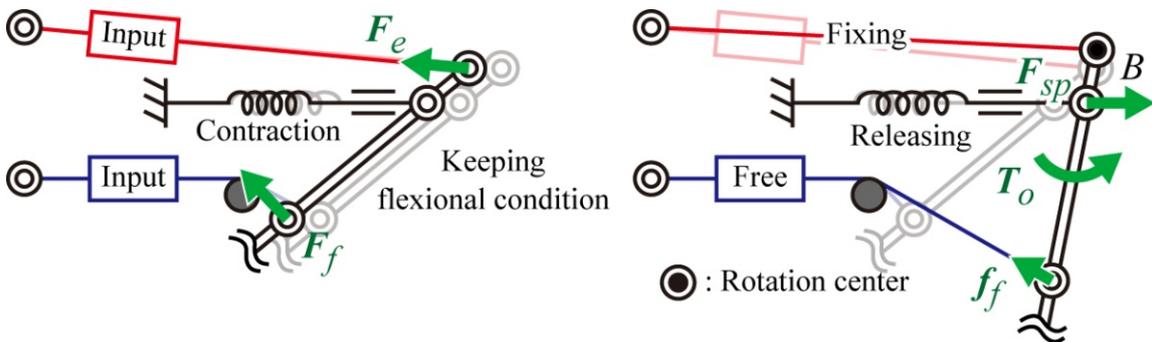
Fig. 3-7 Link vectors



(a) Flexion

(b) Extension

Fig. 3-8 Walking motion



(a) Charging

(b) Releasing

Fig. 3-9 Jumping motion

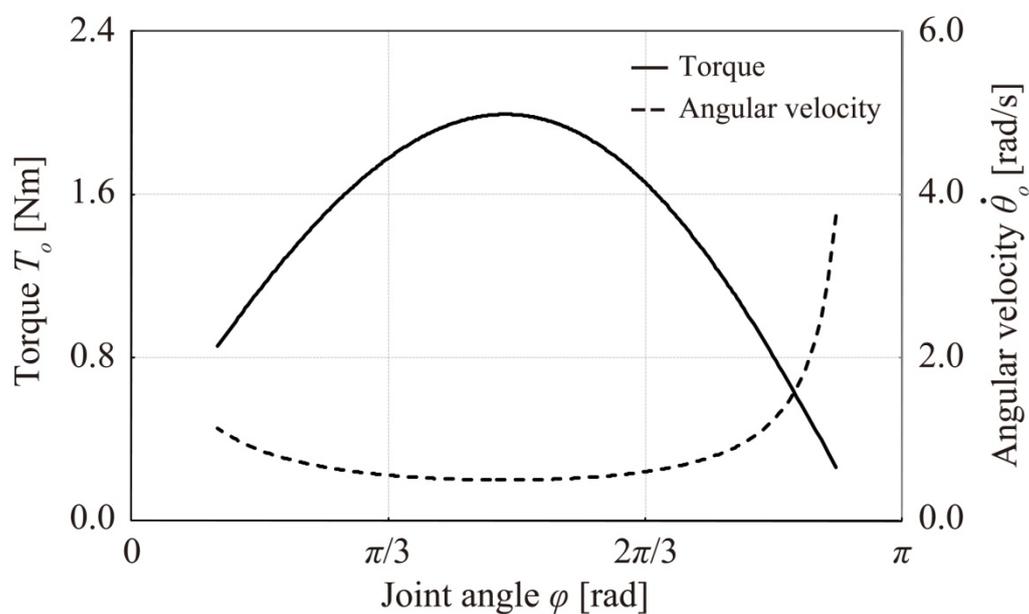


Fig. 3-10 Torque and angular velocity during extension

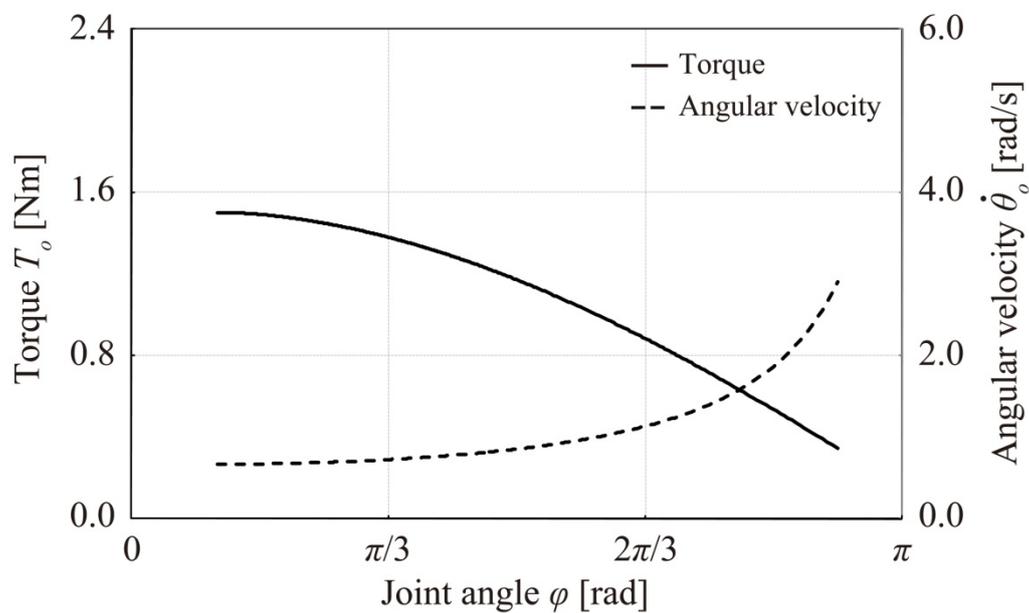


Fig. 3-11 torque and angular velocity during flexion

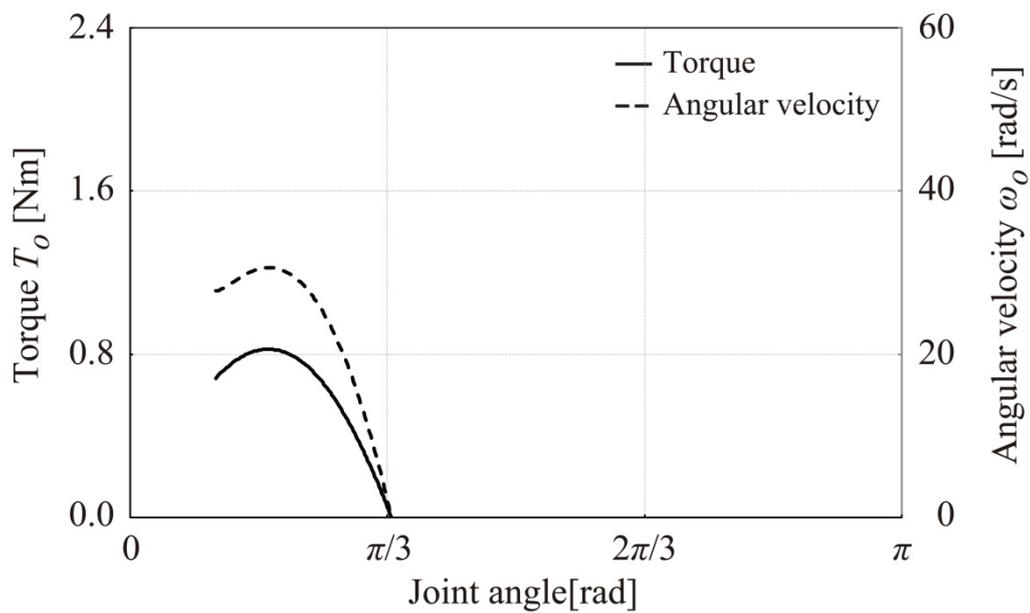


Fig. 3-12 Torque and angular velocity during jumping motion

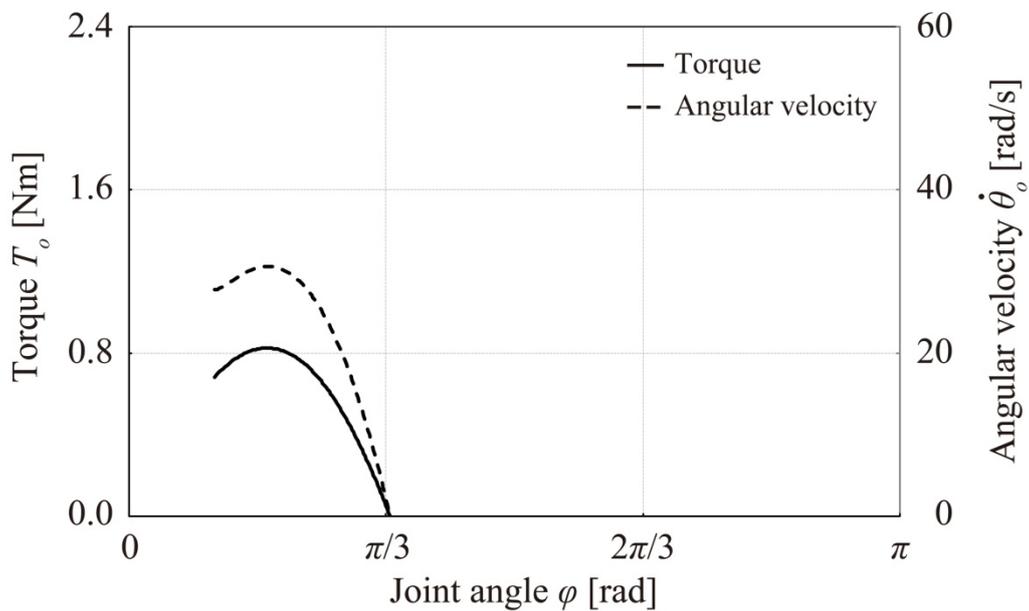


Fig. 3-13 Power during jumping motion

Table 3-1 Link lengths

l_b [mm]	l_{sp} [mm]	l_{o1} [mm]	l_{o2} [mm]	l_b [mm]
60	200	20	150	50

Table 3-2 Specification of extensional actuator

Power	W_{act}	[W]	1.0
Force	F_{act}	[N]	100
Velocity	v_{act}	[m/s]	100
Viscosity	u_f	[Ns/m]	1.0

Table 3-3 Specification of flexional actuator

Power	W_{act}	[W]	1.0
Force	F_{act}	[N]	10
Velocity	v_{act}	[m/s]	1.0
Viscosity	u_f	[Ns/m]	1.0

第4章

高出力関節機構の開発

第4章 高出力関節機構の開発

4.1 はじめに

本章では、第2章、3章で得られた知見をもとに目標の跳躍性能を有する高出力関節機構を設計・開発することである。なお、目標の跳躍性能は $\hat{J}=1.0$ 、ロボットの仕様は $M=1.0[\text{kg}]$ 、 $l=0.3[\text{m}]$ ($l_{acc}=0.2[\text{m}]$) とする。

4.2節では、バッタの跳躍機構を関節機構に適用可能なモデルに変更したものに対して解析を行い、モータが関節機構の出力特性に及ぼす影響について検証する。4.3節では、まず上記のロボットの仕様において、目標の跳躍性能を実現するために関節機構とモータに最低限必要な \bar{W}_{\min} を推定し、本関節機構に使用するモータを決定する。次に、決定したモータの粘性係数を測定し、設計をする上で必要なモータの減速比やリンク長を決定する。また、設計・制作した関節機構の機構と制御回路について述べる。

4.2 高出力関節機構の解析

4.2.1 高出力関節機構のモデル

第2章の知見をもとに考案した高出力関節機構のモデルをFig.4-1に示す. 本関節機構は, 出力リンクに接続されたワイヤをプーリに接続されたモータの力で巻き取ることにより, バッタの跳躍機構における伸筋と屈筋と同様の働きを示す. この時, 伸筋, 屈筋用ワイヤに作用する収縮力 F_e , F_f と伸筋, 屈筋用モータが出力するトルク T_e , T_f との関係は, それぞれ次式で表される.

$$F_e = \frac{T_e}{r_e} \quad (4-1)$$

$$F_f = \frac{T_f}{r_f} \quad (4-2)$$

r_e , r_f は, それぞれ伸筋, 屈筋用モータに接続されたプーリの半径である. 屈曲, 伸長動作時における本関節機構の出力トルクと角速度は式 (4-1), (4-2) を式 (3-9), (3-10), 跳躍動作時の出力トルクと角速度は式 (3-14), (3-19) にそれぞれ代入することで求めることができる.

4.2.2 モータの粘性係数

一般的に市販されているモータは高速回転時に最高効率を得るため, 高いトルクが必要とされる関節機構等に使用する際には歯車等で減速させる必要がある. しかし, モータの回転数を減速させた場合, 減速比に応じてモータの機械的な粘性が大きくなるという問題がある. ここで, Fig.4-2 示されるようなモータが取り付けられた n 段歯車減速機の粘性係数について考える. n 段歯車減速機の回転角度を θ_n , i 段目の減速比を ξ_i , i 段目の車軸回転方向の粘性係数を $\tilde{\mu}_i$ としたとき, i 段目の回転角度 θ_i は次のように表される.

$$\theta_i = \frac{\xi_n}{\xi_i} \theta_n \quad (4-3)$$

粘性抵抗によって消費する n 段歯車減速機全体の運動エネルギー E は次式で与えられる.

$$E = (\tilde{\mu}_0 + \frac{\tilde{\mu}_1}{\xi_1^2} + \dots + \frac{\tilde{\mu}_n}{\xi_n^2}) \theta_n \dot{\theta}_n \xi_n^2 \quad (4-4)$$

μ_0 はモータの粘性係数, $\dot{\theta}_n$ は n 段歯車減速機の出力軸の角速度である. 式 (4-4) より, 全体の等価粘性係数 U は,

$$U = (\tilde{\mu}_0 + \frac{\tilde{\mu}_1}{\xi_1^2} + \dots + \frac{\tilde{\mu}_n}{\xi_n^2}) \xi_n^2 \quad (4-5)$$

で表される．モータの粘性係数がその他の粘性係数に対して非常に大きいと仮定すれば，全体の等価粘性係数 U は

$$U \cong \tilde{\mu}_0 \xi_n^2 \quad (4-6)$$

と近似される．

4.2.3 モータの減速比の割合

3.34 項と 4.2.2 項の知見より，本関節機構は伸長用モータの減速比が高ければ高いほど，また屈曲用モータの減速比が低ければ低いほど，跳躍動作時において高い出力を得ることができる．しかし，伸長用モータの減速比が屈曲用モータの減速比より大きく上回るならば，共収縮時において屈曲状態を保持することは困難である．したがって，屈曲状態を維持し，かつ最大の出力を得られる減速比の組み合わせを推定する必要がある．

共収縮時に屈曲状態を維持する条件は，式 (3-7) ～ (3-11) より次式で与えられる．

$$\mathbf{J}_e \mathbf{F}_e < \mathbf{J}_f \mathbf{F}_f \quad (4-7)$$

式 (4-6) の両辺の絶対値をとり，式を整理すると

$$\frac{F_e}{F_f} < \frac{l_{02} (\cos \theta_o \sin \theta_{f2} - \sin \theta_o \cos \theta_{f2})}{l_{01} (\sin \theta_o \cos \theta_e - \cos \theta_o \sin \theta_e)} \quad (4-8)$$

となる．この時，屈曲状態時に最大の屈曲トルクが得られると仮定すれば， θ_{f2} を

$$\theta_{f2} = \theta_o + \frac{\pi}{2} \quad (4-9)$$

と表すことができる．式 (4-8) に式 (4-9) を代入すると，

$$\frac{F_e}{F_f} < \frac{l_{02}}{l_{01} (\sin \theta_o \cos \theta_e - \cos \theta_o \sin \theta_e)} \quad (4-10)$$

が得られる．伸長用モータの最大トルクは屈曲用モータの k_{iq} 倍とし，モータの最大の力でバネに力を蓄えていたとすれば，式 (4-10) は次式のように表すことができる．

$$\frac{\xi_e}{\xi_f} < \frac{k_{iq} r_e l_{02}}{r_f l_{01} (\sin \theta_o \cos \theta_e - \cos \theta_o \sin \theta_e)} \quad (4-11)$$

ξ_e , ξ_f は，それぞれ伸長用，屈曲用モータの減速比である．本研究では $k_{iq}=1.0$ とし，式 (4-11) で表される減速比の制約条件を満たすギヤの中から， ξ_e/ξ_f が最大となるようになるギヤの組み合わせを使用する．

4.3 高出力関節機構の設計・制作

4.3.1 粘性測定実験

高出力関節機構を設計するために必要な使用するモータの粘性係数を測定した。Fig.4-3, 4-4 に粘性測定実験に使用した実験装置を示す。Fig.4-4 中の右のモータは粘性を測定されるモータ（高出力関節機構に使用）、左のモータは一定のトルクを供給するためのモータである。ここで、受動的に動作するモータに一定のトルクを与えた時の運動について考える。受動モータに与えるトルクを T_1 、モータの角加速度を $\ddot{\theta}$ 、角速度を $\dot{\theta}$ としたとき、運動方程式は次式で与えられる。

$$(I_1 + I_2)\ddot{\theta} + (\tilde{\mu}_1 + \tilde{\mu}_2)\dot{\theta} = T_1 \quad (4-12)$$

I_1 , I_2 , $\tilde{\mu}_1$, $\tilde{\mu}_2$ は、それぞれトルクを与えるモータと粘性を測定されるモータの慣性モーメント、回転方向の粘性係数を表す。 $\ddot{\theta}=0[\text{rad/s}^2]$ の時、 μ_2 が運動に対して支配的だと仮定すれば式 (4-12) は次の式のように表すことができる。

$$\tilde{\mu}_2\dot{\theta} = T_1 \quad (4-13)$$

式 (4-13) を μ_2 について解くと

$$\tilde{\mu}_2 = \frac{T_1}{\dot{\theta}} \quad (4-14)$$

となる。つまり、一定のトルクをモータに与え、 $\ddot{\theta}=0[\text{rad/s}^2]$ の時の $\dot{\theta}$ を計測することにより、回転方向の粘性係数を導出することができる。

Fig.4-3, 4-4 の実験装置を用いて計測した角速度を Fig.4-5, 得られた角速度と式 (4-14) を用いて算出した粘性係数を Fig.4-6 に示す。実験の結果、モータの粘性係数を $4.0 \times 10^{-7} [\text{Nms/rad}]$ に決定した。

4.3.2 高出力関節機構の開発

3章で導出した出力特性の解析式, 4.2節の減速比の割合の式, 粘性測定実験で求めた粘性係数をもとに, 試行錯誤的にリンク長, プーリの半径, 減速比を決定した. 決定した設計パラメータを Table 4-1 に示す. また Table 4-1 もとに詳細設計した高出力関節機構の外観を Fig.4-7, 駆動ユニットの詳細を Fig.4-8, バネ機構の詳細を Fig.4-9, 関節部の詳細を Fig.4-10, 平行リンクユニットの詳細を Fig.4-11, 関節機構におけるリンクベクトルを Fig.4-12 に示す. 本関節機構は大きく分けて駆動ユニット, スプリングユニット, 関節ユニット, 平行リンクの4つに分類される. 駆動ユニットは, モータ, プーリ, シャフトなどで構成されている. モータの動力がカップリングを介してシャフトに固定されたプーリに伝達するような構造になっており, モータを動作させることでワイヤを巻き取ることができる. スプリングユニットは, スライダ, 圧縮バネ, シャフトなどで構成されており, スライダのスラスト方向のみ受動的に動作する. 関節ユニットは, 出力リンク, ストッパー, シャフトなどで構成されている. 出力リンクの回転はシャフトとカップリングを介してエンコーダに伝達される. また, ストッパーによって伸長, 屈曲角度に制限を与えている. 平行リンクユニットは, 2組の平行リンクと1つの直動リンクで構成されている. 平行リンクを用いることで, 関節機構の回転運動が鉛直方向の運動に変化され, 真上に跳躍することが可能である. 本関節機構において, 3章で述べたバッタの関節機構のリンクベクトルにおける r_b はベース長, r_e は伸張用モータから出力リンクに伸びるワイヤの長さ, r_{sp} はベースから回転軸までの長さ, r_{f1} は2つのモータの位置関係, r_{f2} は屈曲用モータから出力リンクに伸びるワイヤの長さ, r_{o1} , r_{o2} はワイヤから回転軸までの長さに該当する. 開発した高出力関節機構のシステム構成を Fig.4-13, 制御回路を Figs.4-14~15, 写真を Figs.4-16~17, リンク長を Table4-1, 使用を Table4-2 に示す.

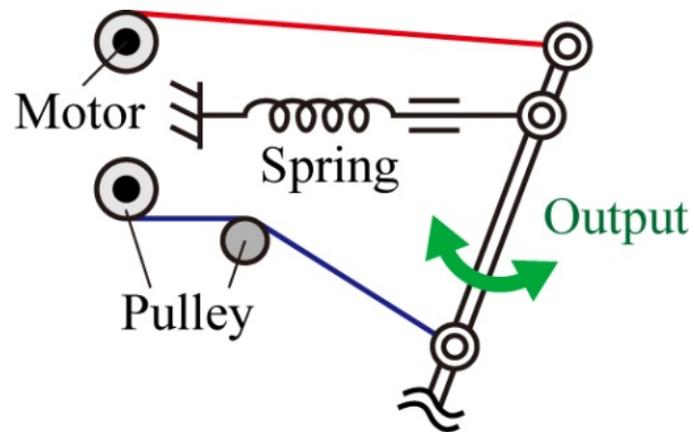


Fig. 4-1 Model of high power joint mechanism

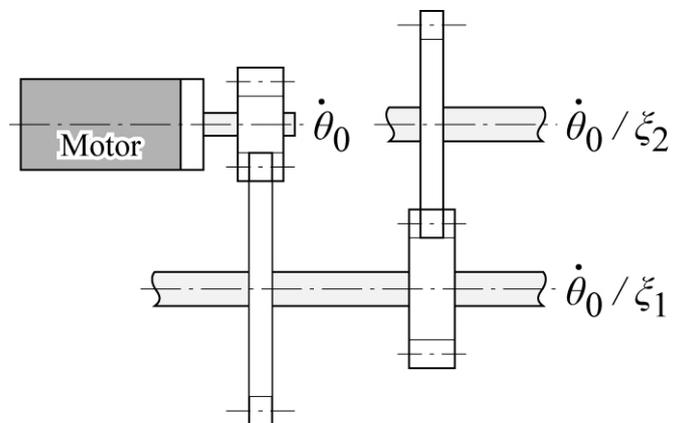


Fig. 4-2 Viscosity of motor with gear

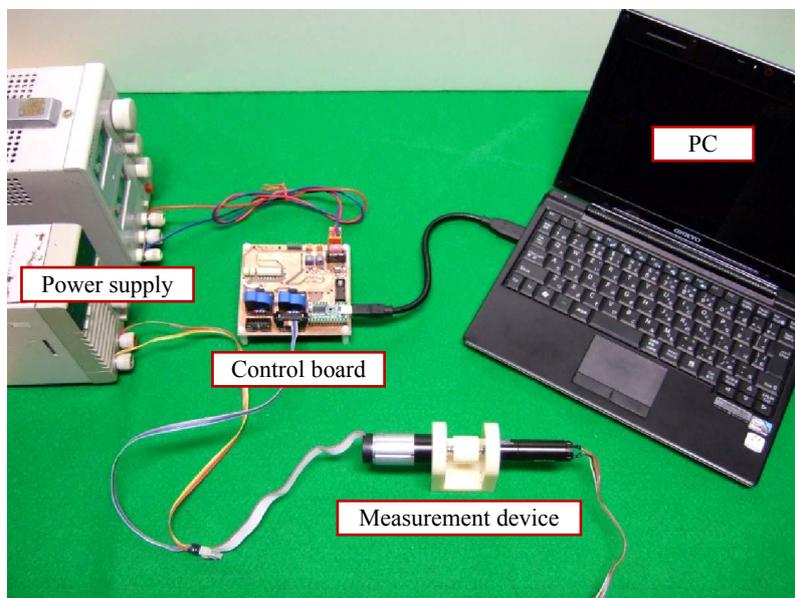


Fig. 4-3 Experiment device

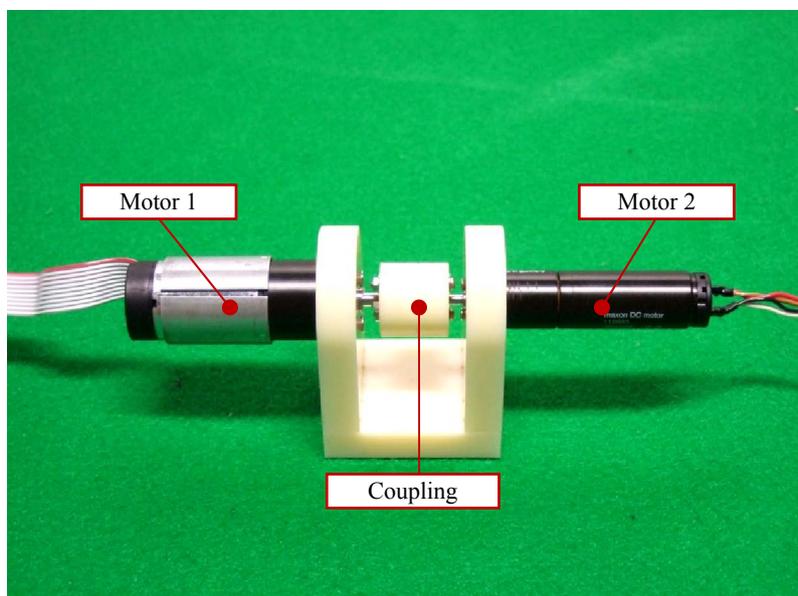


Fig. 4-4 Measurement device

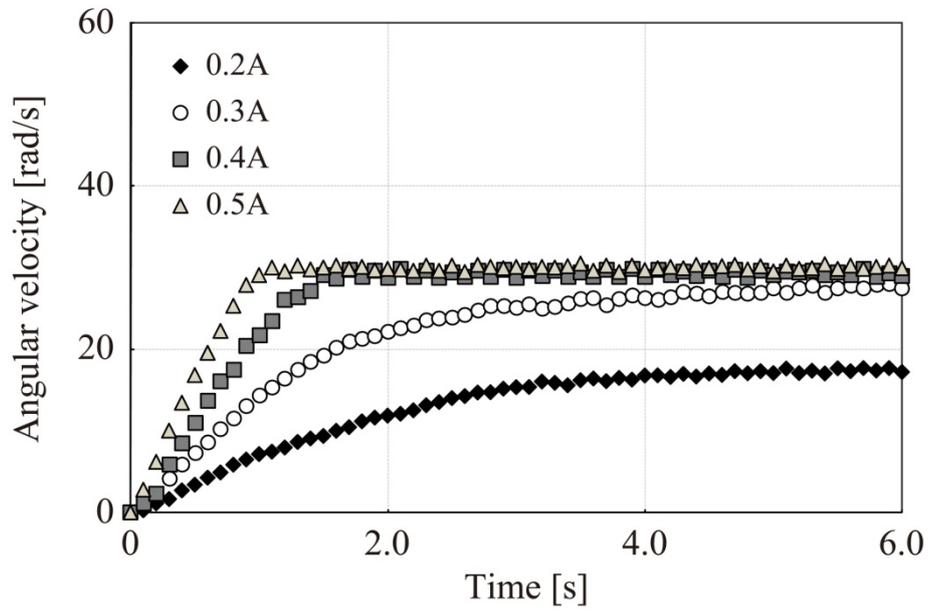


Fig. 4-5 Result of viscosity measurement experimentation

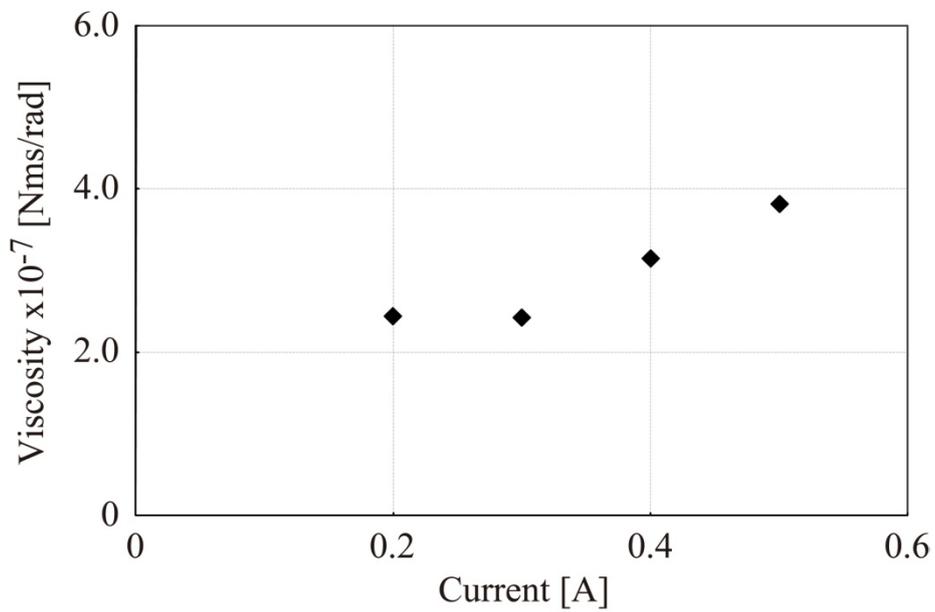


Fig. 4-6 Motor viscosity due to current

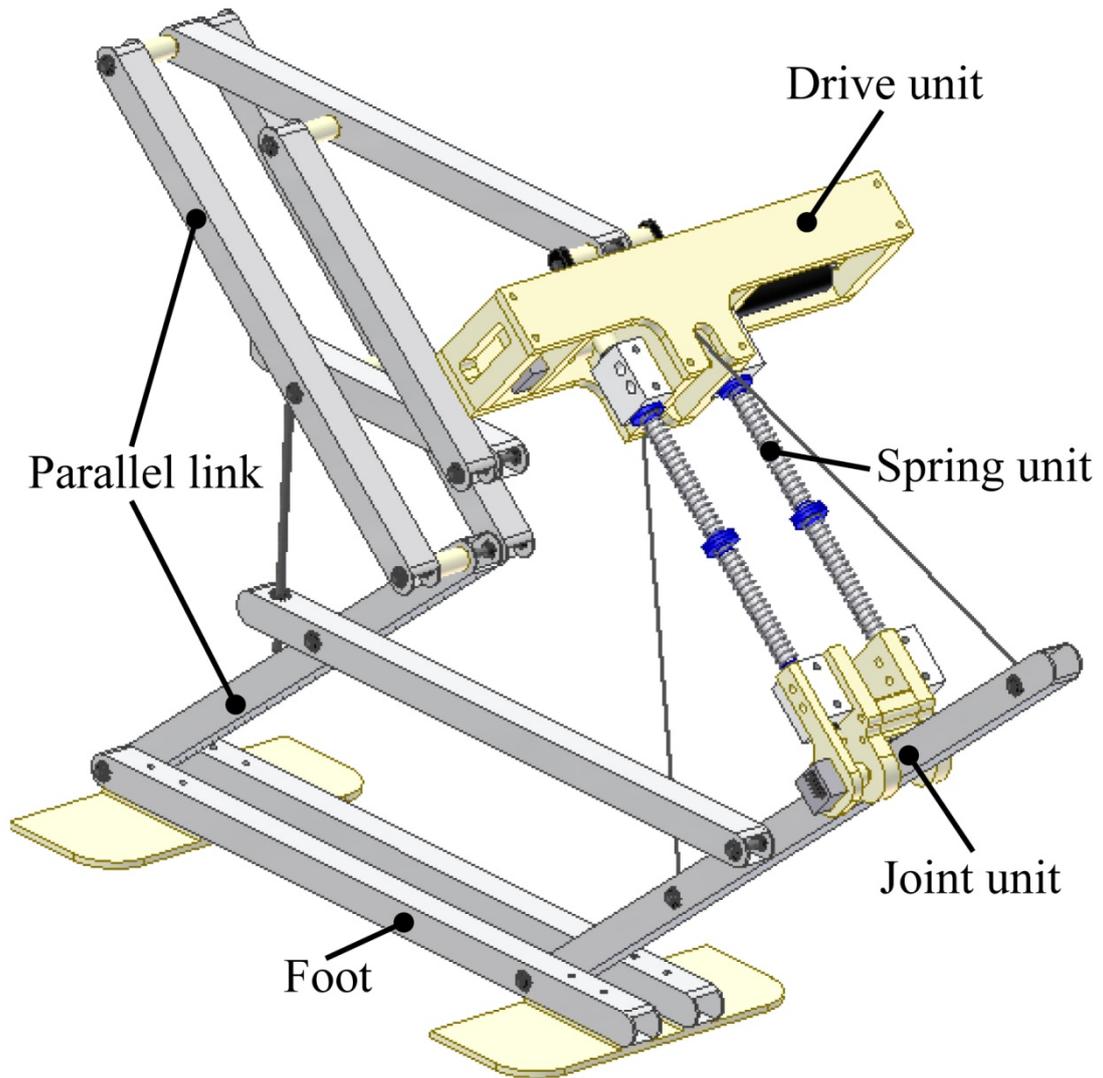


Fig. 4-7 Overview of designed joint mechanism

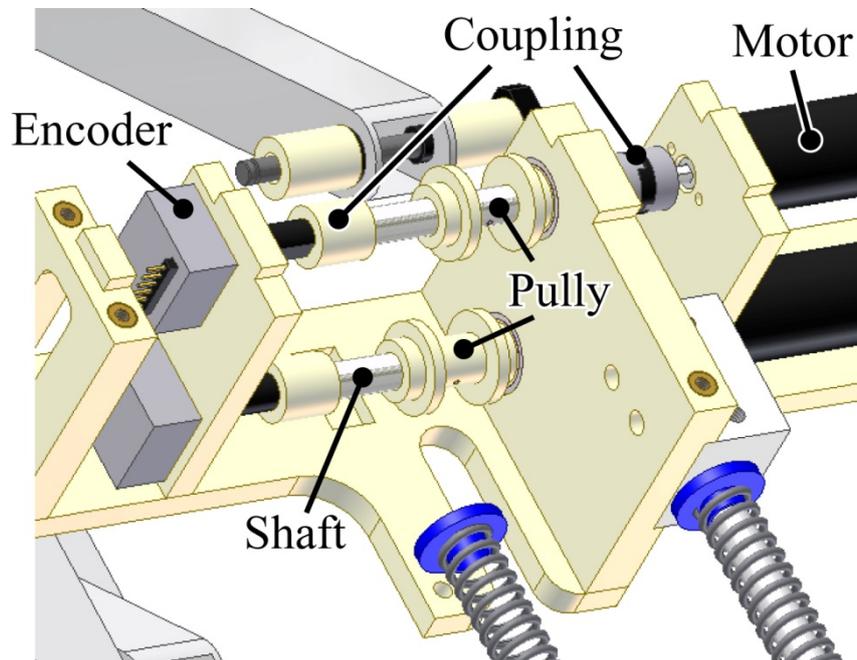


Fig. 4-8 Detail of drive unit

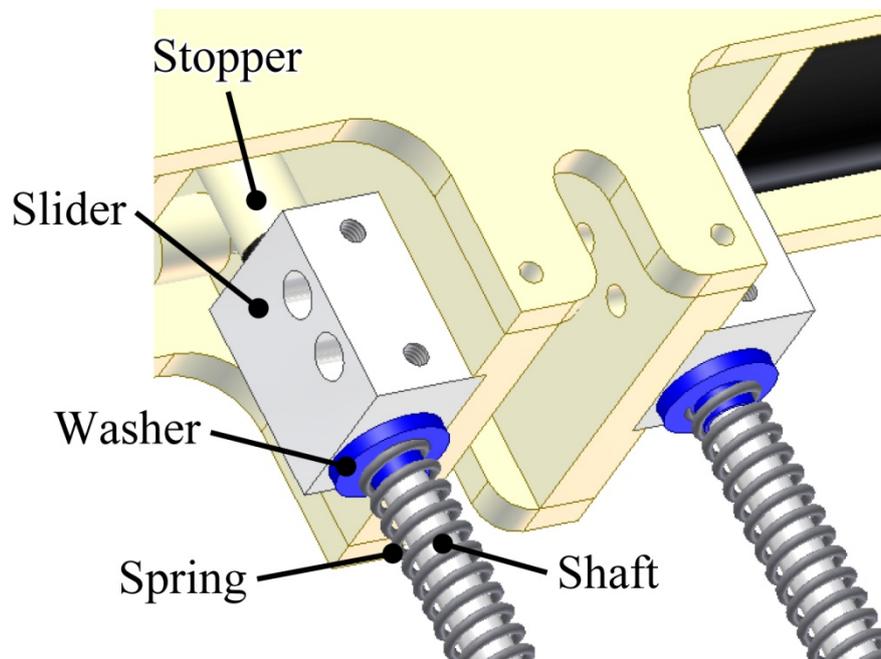


Fig. 4-9 Detail of spring unit

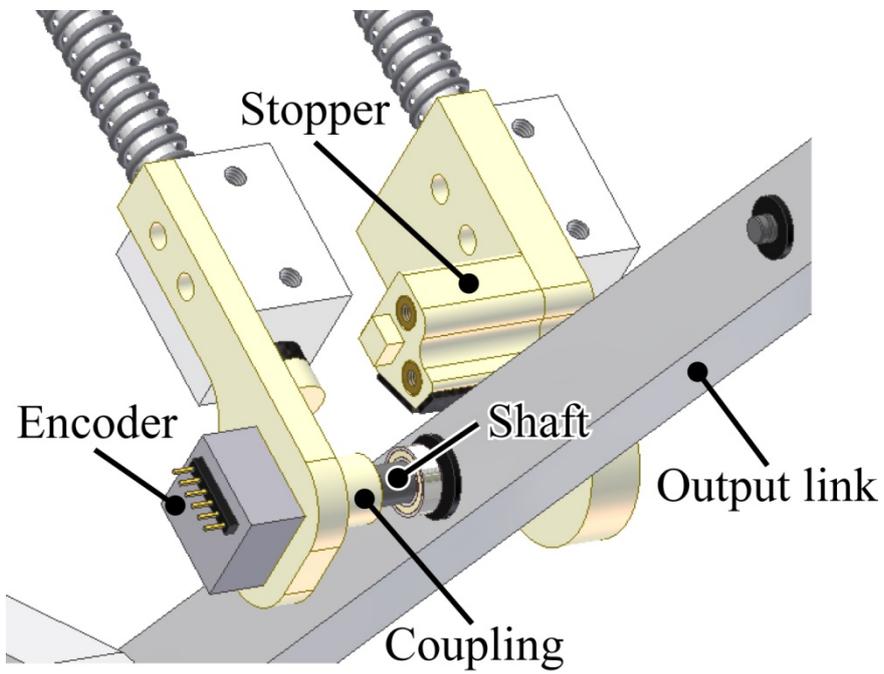


Fig. 4-10 Detail of joint

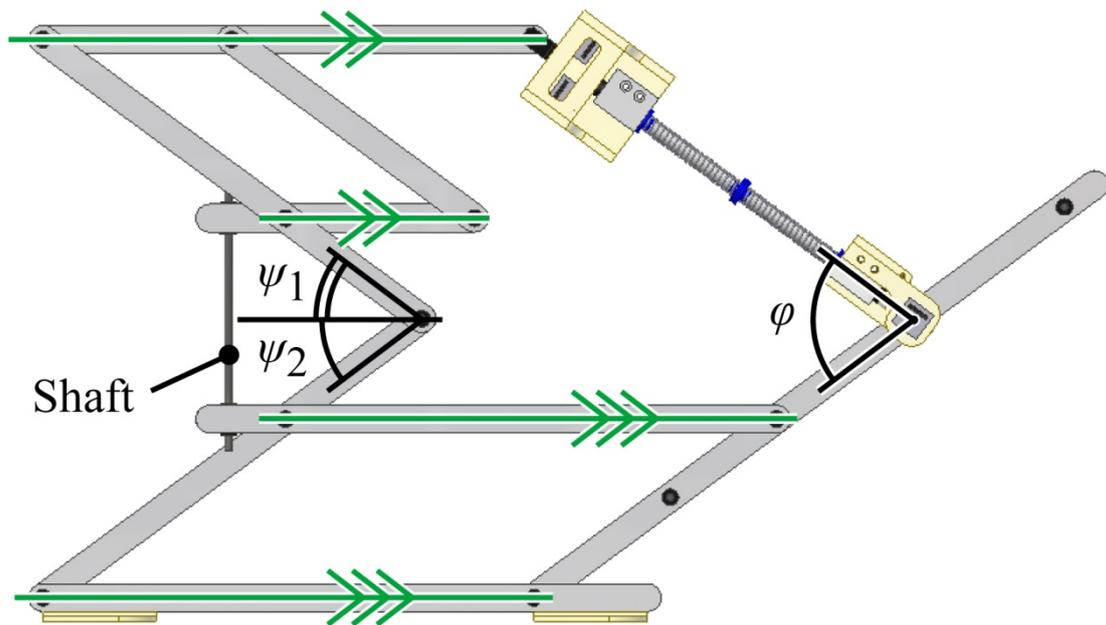


Fig. 4-11 Parallel links

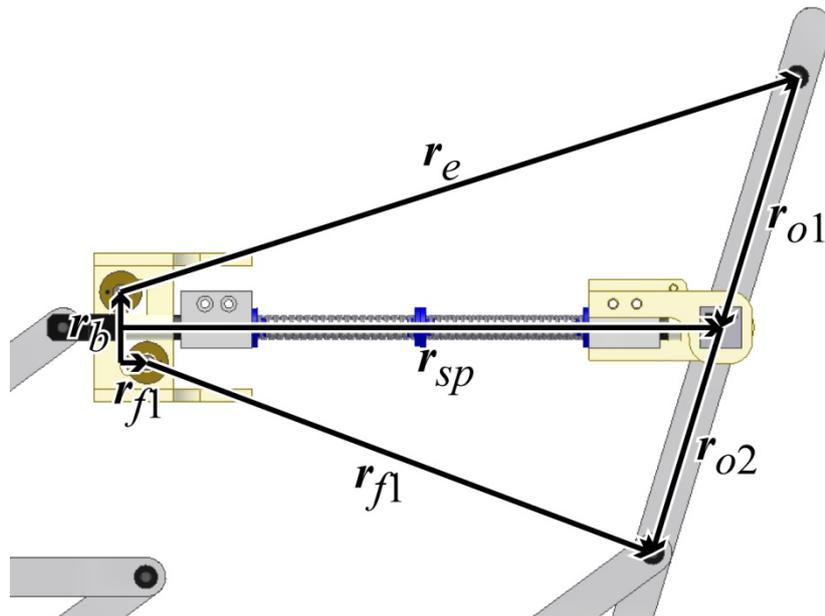


Fig. 4-12 Link vectors of designed joint mechanism

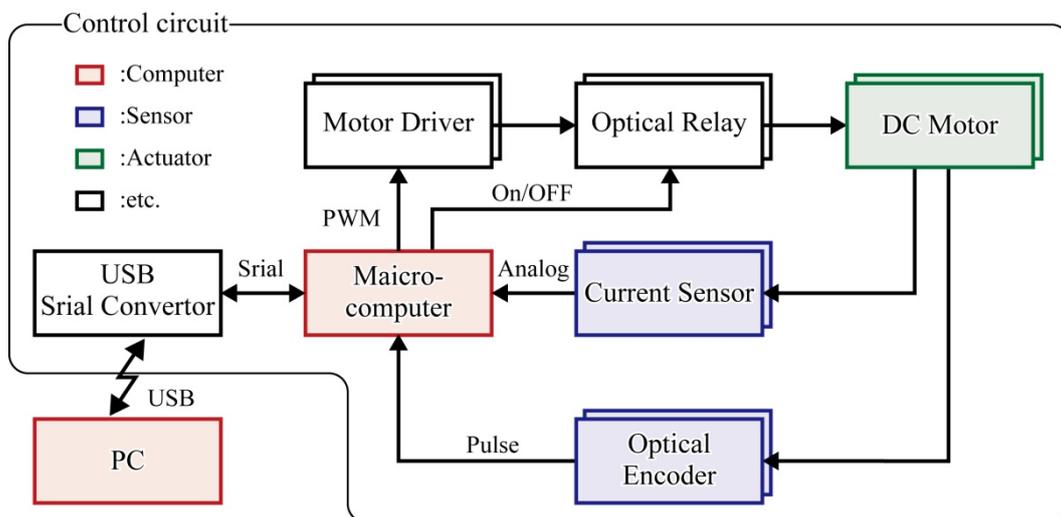


Fig. 4-13 System of high power joint mechanism

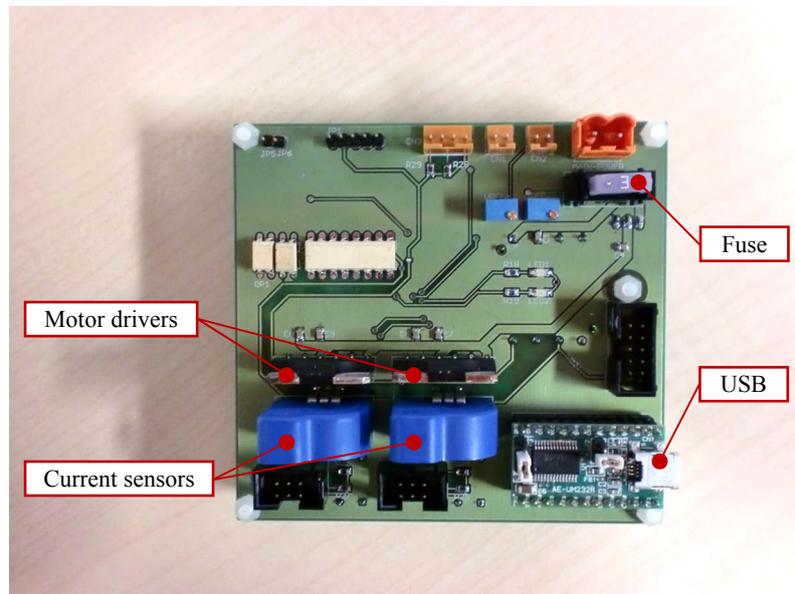


Fig. 4-14 Top view of control board

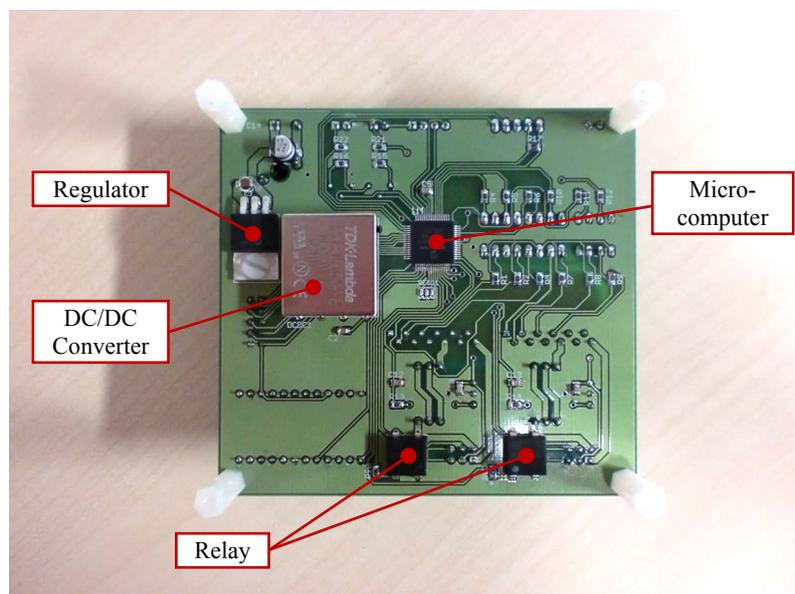


Fig. 4-15 Bottom view of control board

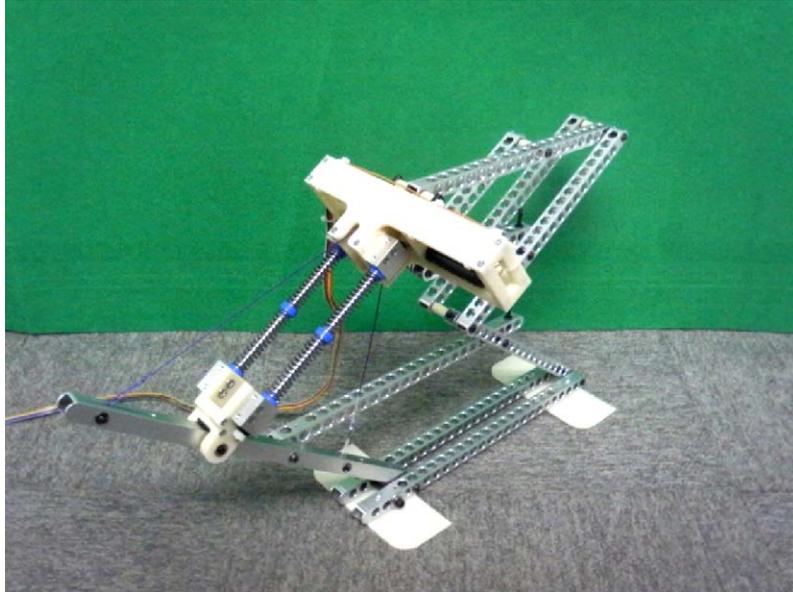


Fig. 4-16 Overview of developed joint mechanism

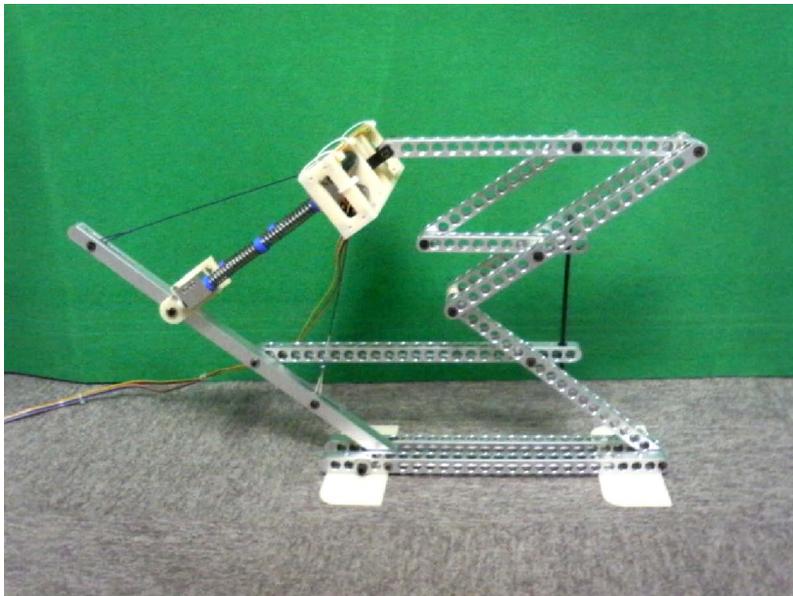


Fig. 4-17 Side view of developed joint mechanism

Table 4-1 Design parameters

	Symbol	Value	Unit
Link length	l_b	20	[mm]
	l_{sp}	230	[mm]
	l_{o1}	100	[mm]
	l_{o2}	160	[mm]
	l_{f1}	10	[mm]
Pulley radius	r_e	3	[mm]
	r_f	4	[mm]
Gear ratio	ξ_e	84	[-]
	ξ_f	19	[-]

Table 4-2 Specification of joint mechanism

Dimensions	W: 206 x D: 572 x H: 326 [mm]
Weight	1.2 [kg]
Actuator	3.2 [W] DC-Motor x 2
Moving range	Max: 1.40 [rad] Min: 0.35 [rad]
Communication	USB Communication
Sensors	Encoder x 1 Current sensor x 2

第 5 章

性能評価実験

第5章 性能評価実験

5.1 収縮力制御実験

本研究で提案した高出力関節機構は、伸長、屈曲用プーリに接続されているワイヤの収縮力に応じたトルクが関節の回転中心回りに発生し、伸長や屈曲動作を実現する機構である。そのため、安定した伸長、屈曲動作、また跳躍動作を実現させるためには、任意の収縮力を発生させる必要がある。任意の収縮力の制御を行うため、本研究では下記に示す PID 制御によるフィードバック系を構成した。

$$u = k_p e + k_i \int e dt + k_d \frac{de}{dt} \quad (5-1)$$

u , e , k_p , k_i , k_d は、それぞれ操作量、目標値との誤差、比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインである。なお、モータによって発生する収縮力 F_i は、式 (5-2) を用い電流値 I_i から求められる。

$$F_i = \frac{\alpha_i I_i \xi_i}{r_i} \quad (i = e, f) \quad (5-2)$$

α_i , ξ_i , r_i は、それぞれモータのトルク定数、減速比、モータに接続されているプーリの半径である。

最大伸長状態時に伸長用モータに 50[N] の目標収縮力、最大屈曲状態時に屈曲用モータに 10[N] の目標収縮力をステップ状に与え、収縮力制御の応答を確認した (Fig.5-1 参照)。Table 5-1 に実験環境、Table 5-2 に実験に使用した PID 制御のゲイン、Fig.5-2 に伸張用モータの収縮力制御の応答の結果、Fig.5-3 に屈曲用モータの収縮力制御の応答の結果を示す。実験の結果、伸張用、屈曲用モータ共に 1.0[s] 以内に目標の収縮力に収束することが分かった。また、屈曲用モータより伸張用モータの方が収縮力のバラつきが大きいことが分かった。これは、2つのモータの減速比の違いによるものだと考えられる。

5.2 伸長・屈曲動作（歩行動作）実験

伸張用，屈曲用モータに目標収縮力を交互に与えることによって伸長，屈曲動作が実現できるか検証するため，Fig.5-1 の実験装置を用いて実験を行った．伸長，屈曲動作実験は，5-1 節の収縮力制御実験と同様のゲインパラメータを用い，下記に示す手順で行った．なお，0[N]の目標収縮力を与えているモータは，リレーを OFF にすることにより電氣的に解放し，逆起電力によって発生する電気抵抗の影響を減少させている．

- (1) 完全屈曲状態に設定する
- (2) 5.0 秒間伸長用モータに 50[N]を与え，屈曲用モータのリレーを OFF にする．
- (3) 5.0 秒間伸張用モータのリレーを OFF にし，屈曲用モータに 10[N]の目標収縮力を与える．
- (4) (2)，(3)を繰り返す．

Fig.5-4, 5-5 に実験中の伸長用，屈曲用モータの応答と関節角度を示す．図中の左軸は収縮力[N]，右軸は関節角度[rad]を表す．実験結果より，上記で示した目標収縮力で動作させた場合，伸長，屈曲動作共に 1.5[s]程度で最大角度まで動作できることが分かった．また，関節が最大角度まで動作した直後，収縮力が大きく変化している．この原因は，最大角度まで動作した際に生じる衝撃である．

5.3 跳躍動作実験

設計した角速度が得られるか検証するために、Fig.5-1 の実験装置を用いて跳躍動作実験を行った。跳躍動作実験は、5-1 節の収縮力制御実験と同様のゲインを用い、下記の示す手順で行った。

- (1) 伸長用モータのリレーを OFF にし、屈曲用モータに 10[N]の目標収縮力を与え、完全屈曲状態にする。
- (2) 伸張用モータに 400[N]、屈曲用モータに 80[N]の目標収縮力を与え、2 つのモータの共収縮によりバネに力を蓄える。
- (3) 伸張用モータの目標は変えず、屈曲用モータのリレーを OFF にし、バネに蓄えた力を解放する。

屈曲用モータのリレーを OFF にした後、1000[Hz]のサンプリングで 300[ms]の間関節角度を取得した。関節角度、角速度を Fig.5-6 に示す。図中の曲線は 3 次の多項式近似から得られた角度であり、角速度は近似式を微分して算出した。跳躍動作実験で得られた角速度と設計時のシミュレーション ($\mu_0=4.0 \times 10^{-7}$ [Nms/rad]) で得られた角速度との比較を Fig.5-7 に示す。本関節機構はバネに蓄えた力を解放してから 138[ms]後に最大の角速度 5.9[rad/s]が得られている。また、開発した関節機構の角速度は、全体的にシミュレーションの角速度の 1/2 程度であった。この原因は、実際のモータの粘性係数が設計時に想定していた粘性係数より大きな値であったと考えられる。Fig.5-8 に跳躍動作実験で得られた角速度と粘性係数を設計時の 2 倍の 8.0×10^{-7} [Nms/rad]に設定したシミュレーションの角速度との比較を示す。開発した関節機構の角速度は、全体的に粘性係数が 8.0×10^{-7} [Nms/rad]のシミュレーションの角速度と同程度であった。

モータの粘性抗力の影響を減少させることで、跳躍動作時の角速度の向上が見込めるかどうか検証するため、屈曲用プーリの半径を 2 倍の 8[mm]に変更し、跳躍動作実験を行った。理論上、屈曲用プーリの半径を 2 倍にすることで屈曲用モータからの粘性抗力の影響が半減する。PID 制御のゲイン、実験手順、角速度の算出方法は、上記と同様である。Fig. 5-9 に 1000[Hz]のサンプリング周波数で 300[ms]の間取得した関節角度と角速度、Fig.5-10 に実験で得られた角速度とシミュレーションで得られた角速度の比較を示す。Fig.5-9 より、屈曲用プーリの半径を 2 倍にした関節機構は、バネの力を解放してから 80[ms]後に最大の角速度 9.23[rad/s]を得ることが分かった。また、関節機構の角速度は $\mu_0=4.0 \times 10^{-7}$ [Nms/rad]と $\mu_0=8.0 \times 10^{-7}$ [Nms/rad]のシミュレーションの角速度の中間程度であった。この原因は、第 4 章で導出したギヤ比と粘性係数の関係を表した式 (4-11)、もしくは粘性係数とトルクの関係を表した式 (4-14) が実機と異なっていることを意味する。

5.4 跳躍高さ測定実験

本関節機構の跳躍性能を評価するため、で Fig.5-10 の実験装置を用いて跳躍高さ測定実験を行った。跳躍高さ測定実験は Table 5-3 のゲインを用い、5-3 節と同じ手順で行った。なお、実験で使用した屈曲用のプーリの半径は 8[mm]である。Fig.5-11 に 30[fps]のビデオカメラで撮影した跳躍の連続写真を示す本関節機構は最大で 40[mm]の高さまで跳躍している。本関節機構の加速距離は 200[mm]なので \hat{J} は 0.2 である。本関節機構の全質量に対して十分なトルクが関節回りに発生しているのにも係わらず、20%程度の \hat{J} しか得られない原因は、モータの粘性抵抗の影響が非常に大きいことだと考えられる。

低い跳躍高さの原因がモータの粘性抵抗であるか判断するため、モータの粘性の影響を受けない動作を用いて跳躍高さ測定実験を行った。この跳躍高さ測定実験は、5-3 節と同じゲインパラメータを用い、下記に示す手順で行った。

- (1) 伸張用モータに 0[N]、屈曲用モータに 10[N]の目標収縮力を与え、最大屈曲所帯にする。
- (2) 伸張用モータに 400[N]、屈曲用モータに 80[N]の目標収縮力を与え、2つのモータの共収縮によりバネに力を蓄える。
- (3) 2つのモータの目標収縮力を固定した状態で、屈曲用ワイヤを切断し、バネに蓄えられた力を解放する。

Fig.5-12 に 30[fps]のビデオカメラで撮影した跳躍の連続写真を示す。実験の結果、屈曲用ワイヤを切断して跳躍した場合、最大で 200[mm]の高さまで跳躍していることが分かった。この場合の \hat{J} は 1.0 であるため、屈曲用モータの粘性抵抗の影響を受けない場合、本関節機構は目標の跳躍性能を満足できることが分かった。

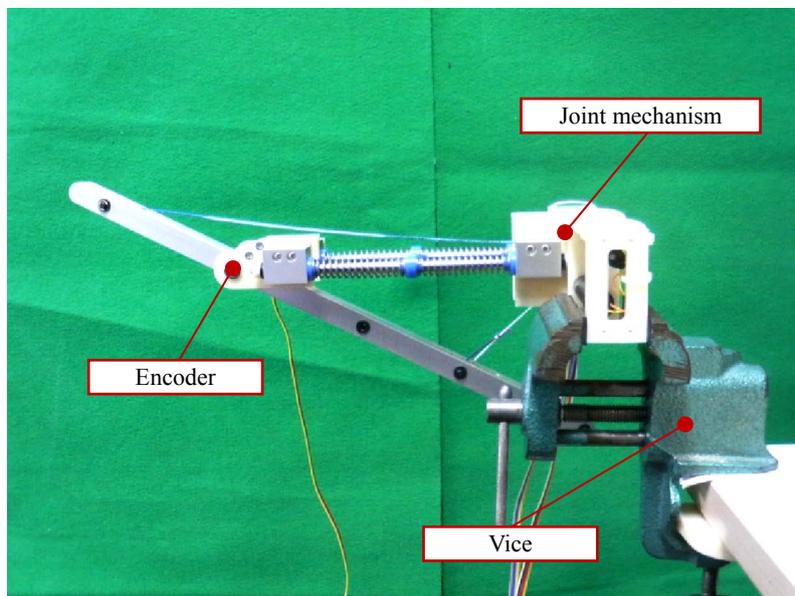


Fig. 5-1 Basic motion experiment

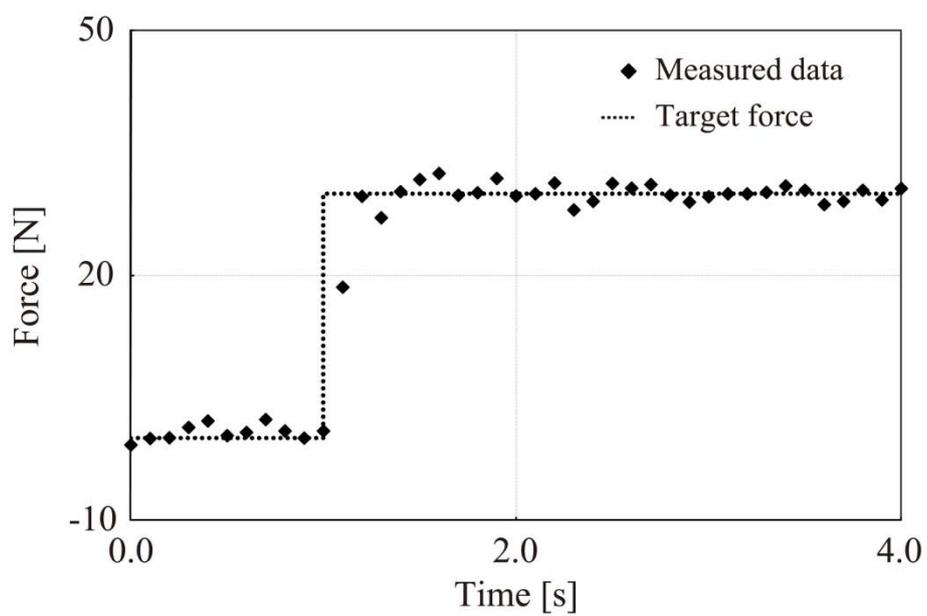


Fig. 5-2 Result of force control of extensor

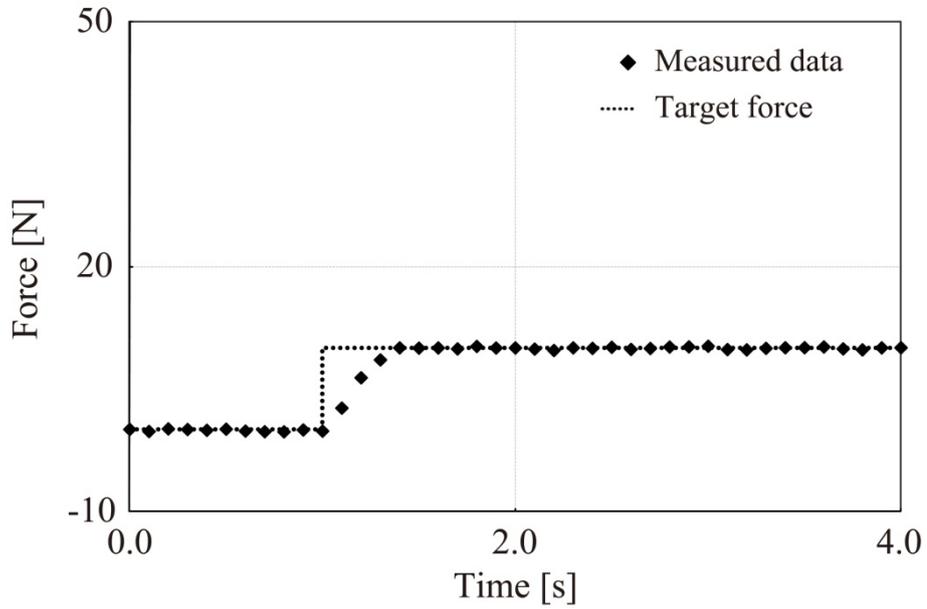


Fig. 5-3 Result of force control of flexor

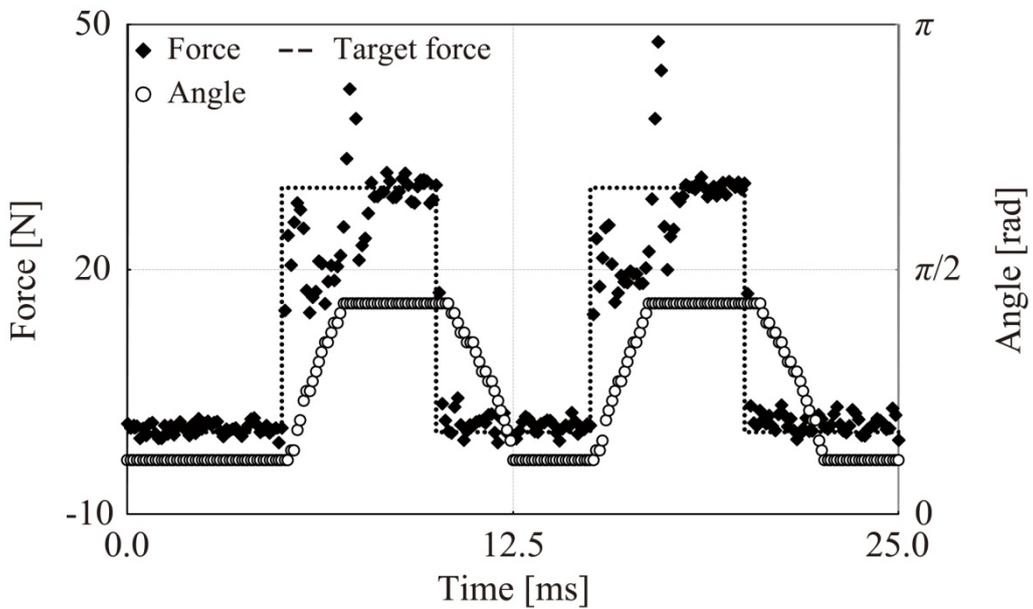


Fig. 5-4 Force control and angle of extensor during extension and flexion

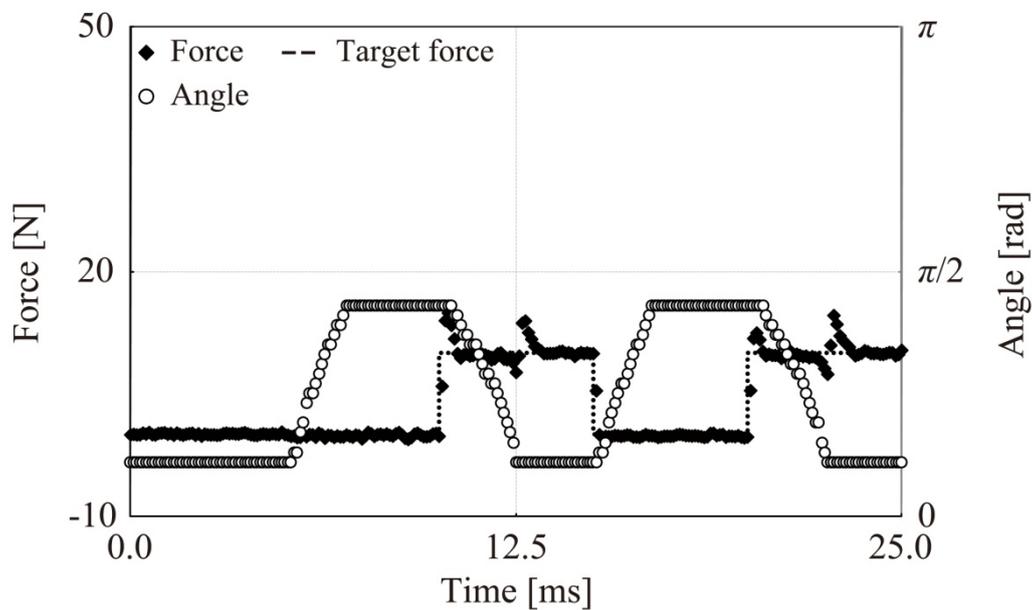


Fig. 5-5 Force and angle of flexor during extension and flexion

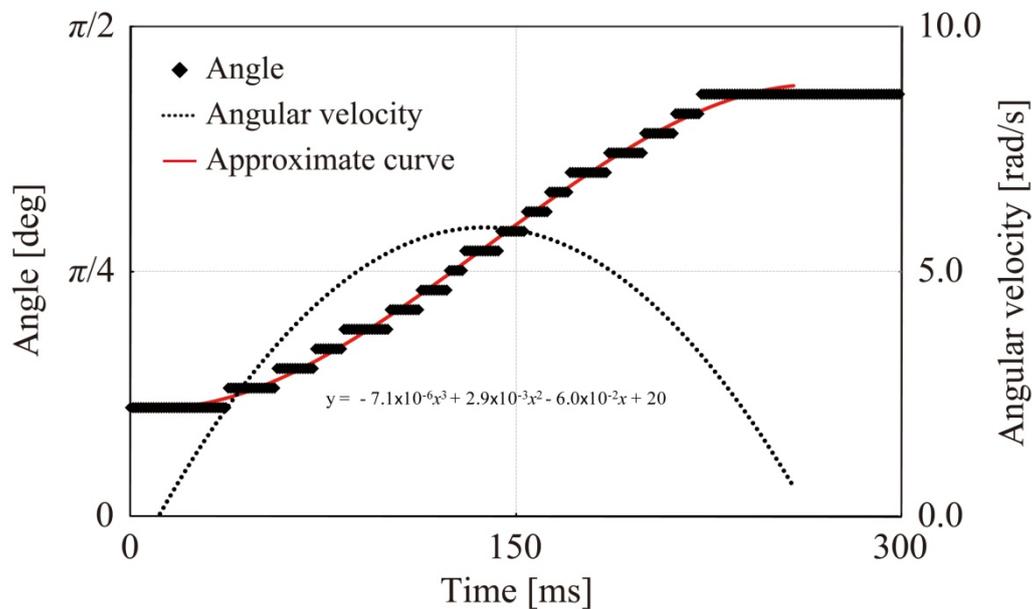


Fig. 5-6 Angle and angular velocity during jumping motion (small pulley)

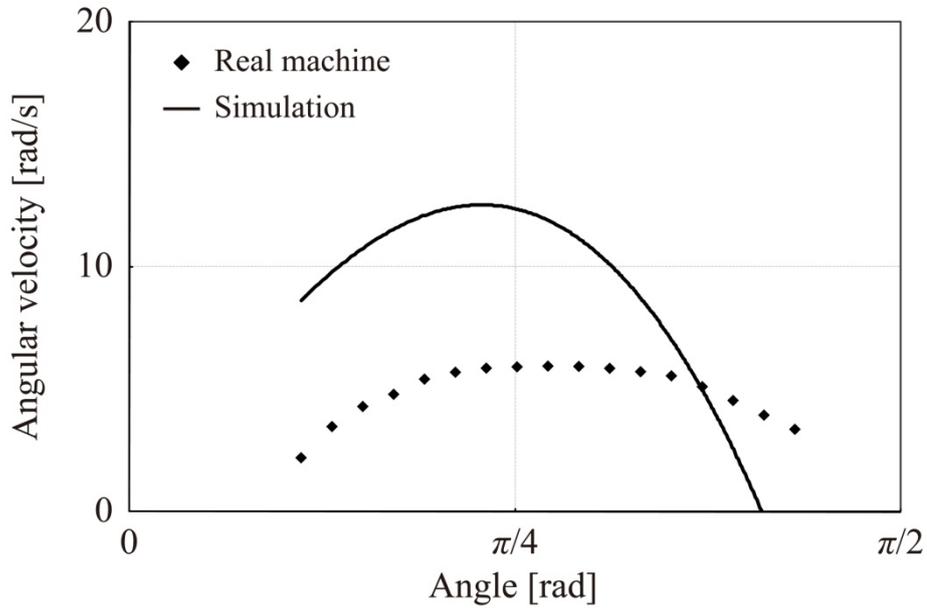


Fig. 5-7 Comparing angular velocity of machine (small pulley) and simulation ($\mu=4.0 \times 10^{-7}$)

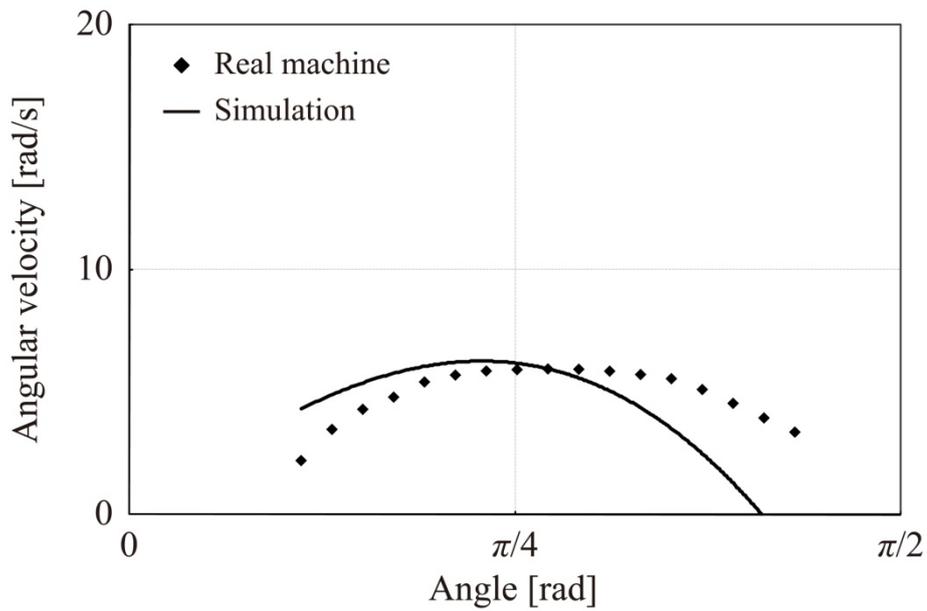


Fig. 5-8 Comparing angular velocity of machine (small pulley) and simulation ($\mu=8.0 \times 10^{-7}$)

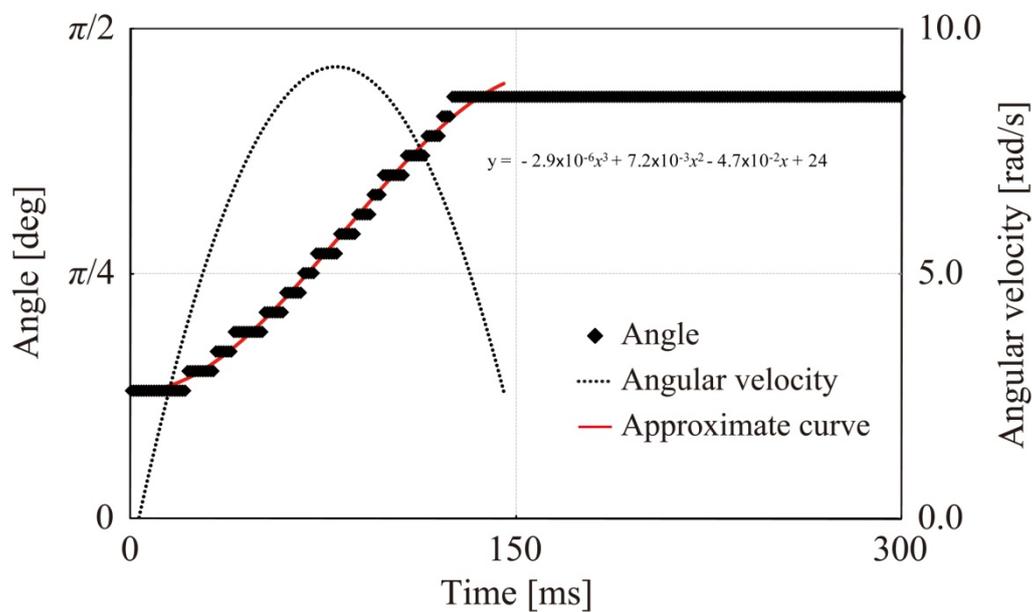


Fig. 5-9 Angle and angular velocity during jumping motion (big pulley)

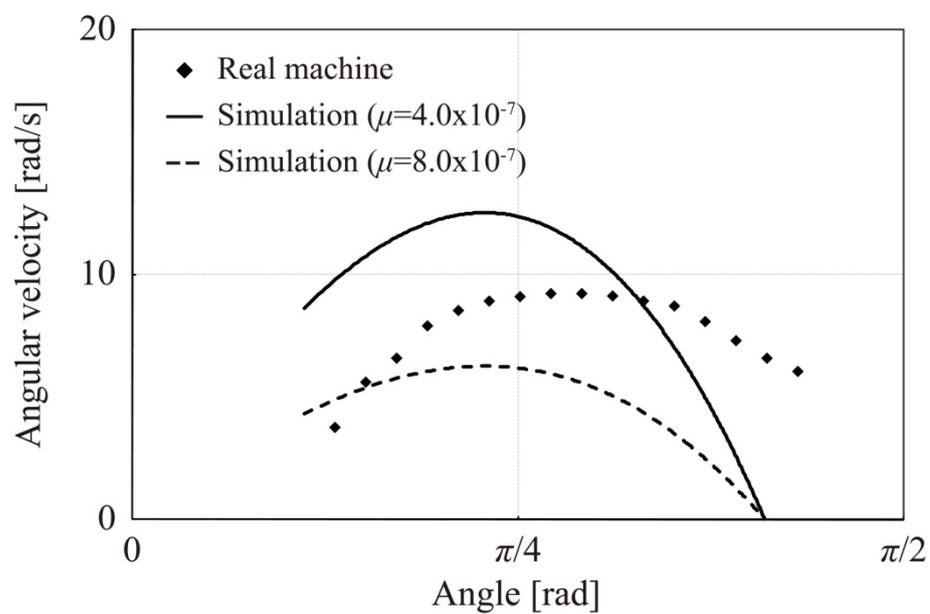


Fig. 5-10 Comparing angular velocity of real machine (Big pulley) and simulation

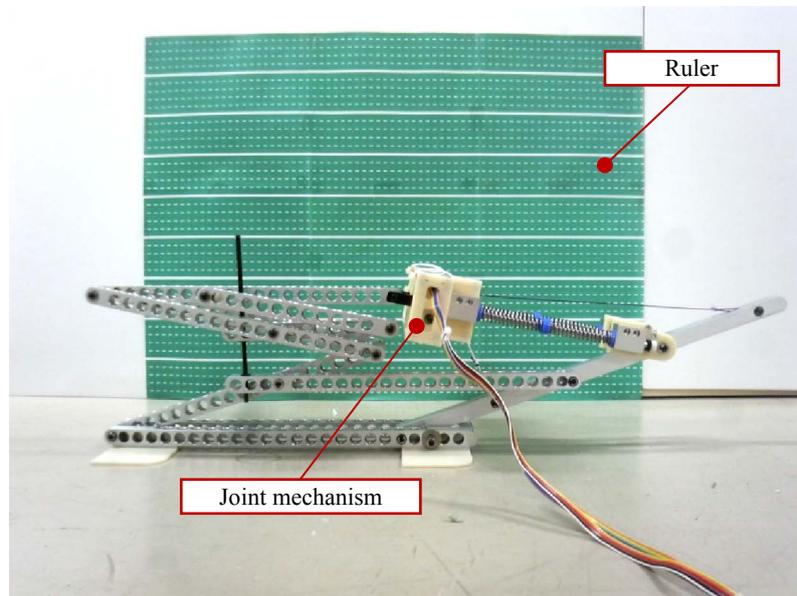


Fig. 5-11 Jumping experiment

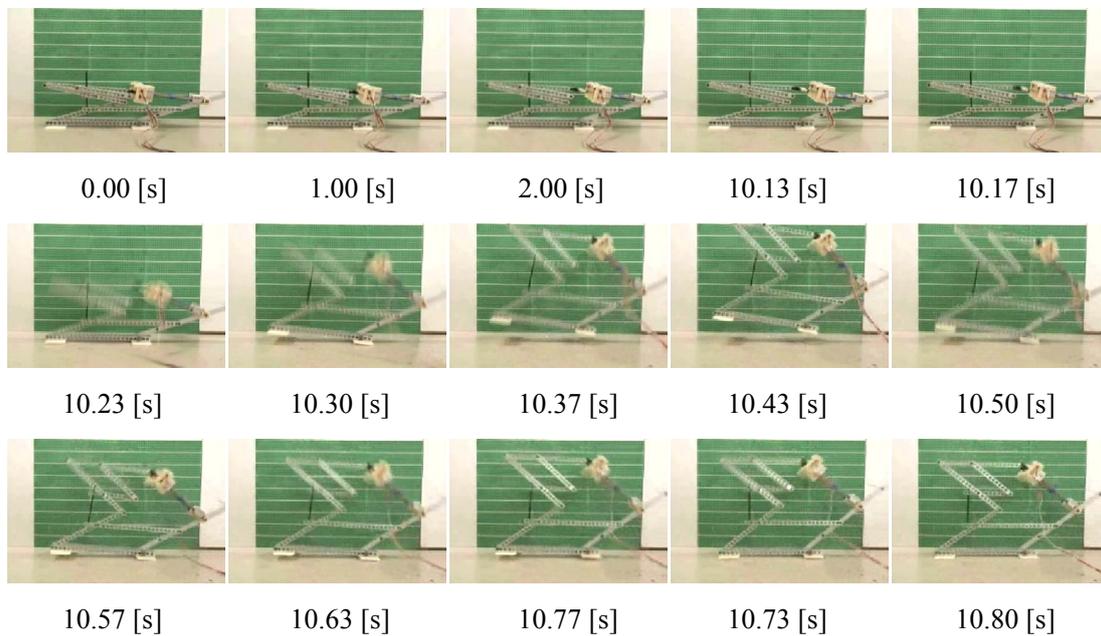


Fig. 5-12 Jumping motion with viscosity effect

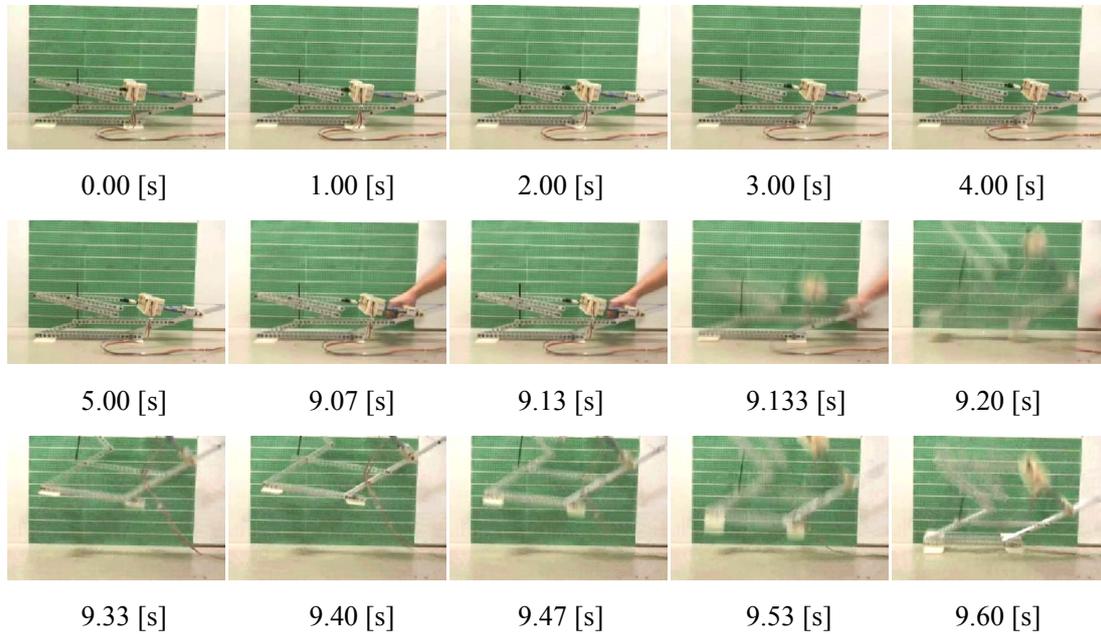


Fig. 5-13 jumping motion without viscosity effect

Table 5-1 Experimental environment

	Name	Value	Unit
Power supply	Input voltage	10.0	[V]
	Remit current	4.0	[A]
PWM signal	PWM frequency	610	[Hz]
	Resolution	16	[bit]
Data processing	Sampling frequency	100	[Hz]
	Moving average	20	[-]

Table 5-2 Control parameters I

	Name	Value	Unit
Extensor	Control frequency	100	[Hz]
	Proportional gain	3.0	[-]
	Differential gain	0.5	[-]
	Integral gain	2.0	[-]
Flexor	Control frequency	100	[Hz]
	Proportional gain	0.8	[-]
	Differential gain	0.5	[-]
	Integral gain	0.8	[-]

Table 5-3 Control parameters II

	Name	Value	Unit
Extensor	Control frequency	100	[Hz]
	Proportional gain	6.0	[-]
	Differential gain	0.5	[-]
	Integral gain	2.0	[-]
Flexor	Control frequency	100	[Hz]
	Proportional gain	0.8	[-]
	Differential gain	0.5	[-]
	Integral gain	0.8	[-]

第 6 章

考察及び結論

第6章 考察及び結論

6.1 跳躍ロボットの設計指針に関する考察

第2章では、跳躍ロボットに必要な関節機構の性能を概算することを目的として、目標の跳躍比を実現するために最低限必要な関節機構の出力質量比の推定方法について議論した。推定するために使用したモデルは、胴体部の質量と脚部の質量で構成される2質点跳躍モデルである。胴体部の質量は、胴体部を支えるための構造部材の質量と胴体部を加速させるための関節機構の質量に分けて扱った。本研究の2質点跳躍モデルでは、従来の2質点系では困難な関節機構の出力質量比の推定を行うことが可能である。2質点跳躍モデルにおいて、関節機構の出力質量比は跳躍比、加速に関する質量比、強度に関する質量比の3つの無次元パラメータの関数として与えられる。関節機構の出力質量比を推定するために、まず設計者がロボットの全質量、脚長、目標の跳躍能力を決定する。次に、座屈破壊しないために必要な構造部材の強度の観点から強度に関する質量比、最適化の観点から質量比を算出し、最終的に関節機能の出力質量比を得る。

提案した推定方法を用い解析の結果、質量が小さいロボットほど出力質量比が大きく、質量が大きいロボットほど小さいという傾向が得られた。この傾向は、ロボットの質量が大きければ大きいほど、確保できるアクチュエータの質量が大きくなることを意味する。質量が大きいロボットほど強度に関する質量比が小さく、十分なアクチュエータ質量を確保することができ、相対的に出力質量比が小さくなる。

推定した出力質量比が実現可能か検討するため、一般的に市販されているモータの出力質量比と比較した。比較の結果、市販されているモータだけの出力では目的の跳躍力が得られないことが分かる。

モータから出力されるトルクを向上させる方法として、ギヤやリンク機構などの減速機を取り付ける方法が考えられるが、単に減速機は出力されるトルクと角速度の割合を変化させる働きしかないため、出力を増幅することはできない。したがって、市販されているモータで目標の跳躍力を実現するためには、モータの性能を向上させるか、もしくはエネルギーを蓄える機構を取り付ける必要がある。

エネルギーを蓄える機構の有効性を検証するため、バネ機構を有したモデルに使用するモータに最低限必要な出力質量比を推定した。このモデルにおいて、モータはバネにエネルギーを蓄えるためだけに使用し、跳躍はバネに蓄積されたエネルギーのみを利用すると仮定した。推定の結果、質量が小さいロボットほど跳躍に必要な射出速度が小さくなるという結果が得られた。同じ運動エネルギーを蓄積するためには、質量が小さいロボットは十分な跳躍速度を加速によって得る必要がある。また、バネ機構を用いることによって、市販されているモータを用いて目標とする跳躍力を実現することが可能であると考えられる。

6.2 バッタの跳躍機構のまとめ

第3章では、まずバッタの後脚にある各部位の機能やバッタの跳躍機構について述べた。バッタは、後脚に存在するバネと同じ性質のレジリンで構成された半月突起に力を蓄え、その蓄積した力を瞬間的に解放することで、筋肉単体では実現することができない高い跳躍運動を実現している。下記にバッタの後脚の特徴及び動作をまとめた。

【バッタの後脚の特徴】

- (1) 主にバネに力を蓄える伸筋の方が屈筋より収縮力が大きい。
- (2) バネと同じ性質である半月突起がある。
- (3) 屈筋の収縮力の方向を変化させるランプがある。
- (4) 最大屈曲状態時にエネルギーを蓄積する。

【バッタの後脚の動作】

- (1) 伸長、屈曲時には片方の筋肉のみを使用する。
- (2) 力を蓄積する際には、伸筋と屈筋を共収縮させる。
- (3) 蓄えた力を解放する際には、伸筋を収縮させた状態で屈筋を弛緩させる。

静力学的にバッタの後脚の出力特性を解析するため、上記に示す後脚の特徴や動作を踏まえ、バッタの後脚のモデリングを行った。後脚のモデルにおいて、2つのアクチュエータは伸筋と屈筋、直動方向に稼動する圧縮バネは半月突起、プーリはランプを表現している。伸長、屈曲動作時において、駆動させないアクチュエータ（受動アクチュエータ）は負荷（粘性抵抗）として作用し、バネの長さは変化しないと仮定した。一般的に関節機構に用いられるような高トルクなアクチュエータは高剛性であり、粘性抵抗が高い。後脚のモデルをより現実的なモデルに近付けるため、受動的に動作するアクチュエータは粘性抵抗によって負荷を発生させると仮定した。跳躍動作時において、バネに力を蓄積させるときには、伸筋用アクチュエータの収縮力のみが作用すると仮定した。蓄積する力を解放する時には、屈曲用アクチュエータは負荷として作用するとした。また、解放時には、伸長用アクチュエータの長さはほとんど変化しないと仮定した。

上記で示した後脚のモデルは、2入力（伸筋、屈筋の収縮力）、1出力（関節周りのトルク）のシステムであるため、後脚のモデルの姿勢（関節角度）に対して入力が一意に決定されない。このようなシステムにおいて、順運動学の関係式を微分してヤコビ行列を導出することは困難である。本研究では微分ではなく外積から導出されるヤコビ行列を用いて、後脚のモデルの出力特性の解析を行った。外積から導出されるヤコビ行列は微分のヤコビ行列とは異なり、入力される収縮力の方向（単位方向ベクトル）を持つ。

導出したバッタのモデルの入出力関係の式を用いてシミュレーションを行った。シミュレーションに使用するリンク長や最大伸長、屈曲角度はバッタの資料をもとに決定した。シ

ミュレーションの結果，最大屈曲状態において伸長時のトルクは屈曲動作時のトルクの 1.5 倍以上であった．これは，共収縮状態時において，屈曲状態を保持することが可能であることを示している．跳躍動作時の最大トルクは伸長動作時の 1/2 程度，最大角速度は伸長時の 10 倍程度であった．跳躍動作時に最大で搭載しているアクチュエータの 10 倍以上の出力を発生できることが分かった．これは，バッタが筋肉の収縮力をバネ機構（半月突起）によって高い角速度に変換し，筋肉単体で実現できない出力を発生していることを意味する．したがって，バッタの後脚を規範した関節機構の伸張用モータには，回転速度ではなくトルクを重視したモータを使用するのが望ましい．

6.3 高出力関節機構のまとめ

第2章, 3章で得られた知見をもとに目標の跳躍性能を有する高出力関節機構の設計・制作を行った。高出力関節機構を設計するために, バッタの後脚のモデルにおけるアクチュエータをプーリとモータで表現したモデルを用いた。プーリを介して出力リンクに接続されたワイヤをモータで巻き取ることにより, バッタの跳躍機構における伸筋と屈筋の働きを近似する。本関節機構において, 各モータの減速比は出力に大きな影響を与える。伸張用モータの減速比 ξe は主に伸長動作時のトルク, バネに蓄積する力に影響を及ぼす。屈曲用モータの減速比 ξf は主に屈曲動作時のトルク, 跳躍動作時の角速度に影響を及ぼす。つまり, 減速比の割合 $\xi e/\xi f$ が大きければ大きいほど, 跳躍動作時の出力は大きくなると考えられるが, $\xi e/\xi f$ の大きさによっては共収縮時に屈曲状態を保持できない可能性がある。本研究では, 共収縮時に屈曲状態できる割合の中から $\xi e/\xi f$ が最大となるものを使用した。開発した高出力関節機構の性能を評価するために, 伸長, 屈曲動作実験, 跳躍動作実験, 跳躍高さ測定実験を行った。

伸長, 屈曲動作実験では, 伸張用モータと屈曲用モータを交互に与えたときの収縮力の応答と関節角度を計測した。伸長, 屈曲動作実験を行った結果, 共に1.5[s]程度で最大角度まで動作することが分かった。また, 最大角度まで動作した際に生じる衝撃によって収縮力が振動した。跳躍動作実験の結果, 実機の角速度のピークは, シミュレーションのピークの1/2程度であった。実機の角速度がシミュレーションの結果より大きく下回った主な原因は, シミュレーション時に想定していた値より実際のモータの粘性係数が大きな値であったと考えられる。そこで, モータの粘性係数を減少することで跳躍動作時の角速度が向上するか検証するため, 2倍の半径の屈曲用プーリを使用して再度跳躍動作実験を行った。実験の結果, 屈曲用プーリの半径を2倍にすることで, 角速度が増加する。跳躍高さ測定実験は, 跳躍動作実験と同じ手順で行い, カメラ映像を用いて跳躍高さを測定した。実験の結果, 本関節機構の全質量に対して十分なトルクが関節和真理に発生しているのにも関わらず, 目標の跳躍力の20%程度しか実現していない。原因は, モータの粘性抵抗の影響が非常に原因と考えられる。低い跳躍高さの原因がモータの粘性抵抗であるか判断するため, 屈曲用ワイヤを切断することでバネに蓄積された力を解放し, その時の跳躍高さを測定した。測定の結果, 屈曲用ワイヤを切断して跳躍した場合, 目標の高さまで跳躍していることが分かった。

6.4 生物規範型高出力関節機構の開発について

本研究ではロボットの活動範囲の拡大を目指し、歩行と跳躍動作が可能な小型で高出力な関節機構の開発に取り組んだ。関節機構によって歩行動作を実現するためには、減速機を用いて高いトルクを得る必要がある。減速機を持つ関節機構には力と速度の間にトレードオフの関係があるため、跳躍のような瞬発的な動作を行うことができない。跳躍動作を関節機構によって実現するには、エネルギーを蓄積・解放する機構が必要である。しかし、バネを使用した関節機構は構造上出力を調節することは困難であるため、歩行動作に向かない。この問題を改善するため、本研究ではバッタの跳躍機構に着目し、生物規範型高出力関節機構を開発した。提案した関節機構は従来の関節機構とは異なり、歩行や跳躍のどちらか一方の動作に特化した構造になっておらず、その両方が実現可能である。また、モータの駆動方法によって歩行と跳躍動作の切り替えができるため、クラッチなどの機構を必要とせず、小型に作る事が可能である。

以上のことから、バッタの跳躍機構を模倣した高出力関節機構の有効性が示された。提案した関節機構は、様々な場所で活躍するロボットの関節機構として十分な出力と機能を有していると結論する。

6.5 今後の展望

本研究で提案した高出力関節機構をロボットに使用している関節機構の代替として利用することで活動範囲の向上が図れる、ロボットの活躍の幅が広がると考えられる。例えば、脚式移動ロボットの脚部に使用した場合、ロボットは段差がある環境での歩行だけではなく、跳躍により障害物を飛び越えたり、走行によって俊敏に動作したりすることが可能である。今まで歩行に特化していた脚式移動ロボットが跳躍や走行などの瞬発動作を実現することで、学校や家庭など物が錯乱する人間の生活空間などでの搬送作業や防犯警備などにロボットが進出すると期待できる。

謝辞

本研究の遂行，博士論文の執筆，及び研究室での生活においてお世話になりました皆様への感謝の意をここに記します。

度重なる失態でご迷惑をかけたのにも関わらず終始懇切丁寧なご指導を頂きました指導教官である石井准教授に感謝の意を込め，厚く御礼申し上げます。石井先生は，右も左を分らず戸惑う私に対して親身に接し，物事の見方や考え方，研究に対する姿勢など，研究以外にも多くのことをご教授して下さいました。高専在籍中に参加していたロボットコンテストで培った技術力を評価して頂き，石井先生のご厚意で入学してすぐに宙返り運動が可能なロボット“Jumping Joe”のプロジェクトに参加させて頂きました。“Jumping Joe”は強力なバネとモータを駆使して宙返り運動を実現するため，非常に壊れやすく調整が難しいロボットでした。展示会やイベントの度に“Jumping Joe”のメンテナンスに苦勞する私に対して石井先生は，ご自分が体験された経験を踏まえた技術的なノウハウをご教授下さいました。大変感謝しております。博士後期課程においては，下水道管検査ロボットや船底清掃ロボット，血栓症予防ロボット等の開発プロジェクト，研究室内対抗ロボットコンペディションの取りまとめ役，石井研究室発ベンチャー企業 RoboPlus ひびきの柵の代表取締役など，普通の研究室では中々経験することができない貴重な体験をさせて頂きました。私がプロジェクトの作業で徹夜している際，石井先生はいつも付き添って下さいました。特に印象的だったのが東京に出発する前日の船底清掃のメンテナンスの時で，夜中遅くに石井先生と塩水をロボットにかけながら問題個所を探していたことは，今でもはっきりと覚えております。

石井先生のもとで過ごした 5 年間は決して楽しいことばかりではありませんでしたが，私にとって非常に貴重で有意義な時間でした。石井先生なくしては，博士の研究を遂行できるほどの能力を身につけられなかったと思います。まだ石井先生には研究員として 1 年間ほどお世話になりますが，早く一人前の研究者として社会に貢献できるよう，日夜研究に励んでいこうと思います。

本論文発表の審査をお受けして頂きました九州工業大学の山川先生，永松先生，中川先生に深く感謝致します。先生方には，COE マルチ英才教育のカリキュラムにおいてもご指導，ご助言を頂きました。自分の専門分野とは異なる先生方のおかげで，私は研究に対する視野を大きく広げることができ，博士論文を完成できたと思います。厚く御礼申し上げます。

石井研究室の先輩に当たる Amir Ali Forough Nassiraei さんは、特に RoboPlus ひびきの(株)関係のプロジェクトで大変お世話になりました。私が設計・製作した制御回路に間違いがあり、Amir さんにご迷惑をおかけした際にも「No problem」と暖かい言葉をかけて下さり、親身に接して頂きました。

2010年8月から石井研究室の研究者として戻ってこられたOBの西田周平さんは、博士論文の執筆中に悩んでいた私をいつも励まして下さいました。西田周平さんと同じ研究室のメンバーとして過ごした時間は1年間もありませんでしたが、とても楽しい時間でした。

石井研究室の先輩の佐藤雅紀さんには、常日頃から私の研究の進捗状況などを気遣って頂きました。ご自分の作業でお忙しいのにも関わらず夜遅くまで私の相談をのって下さり、適切なお助言をして頂きました。本当にありがとうございました。

同じ“Jumping Joe”のプロジェクトチームの一員である先輩の園田隆さんには様々な場面で助けて頂き、感謝の気持ちで胸がいっぱいです。展示会やイベントの前日に夜遅くまで二人で“Jumping Joe”を整備していたことを昨日の事の様に覚えております。私が博士後期課程に進学した際には、私の研究の事を気遣って何度もミーティングをして頂き、ご自分の経験で得られた知識や考え方、技術的なノウハウなど様々なことを教えて下さいました。博士の研究が終わり、博士論文が完成したのも、私がここまで成長できたのも紛れもなく園田さんのおかげだと思います。本当にありがとうございました。

石井研究室の先輩である石塚誠さん、大畑智海さん、杉山公一さん、松尾貴之さん、江里口優さん、神田敦司さん、武村泰範さん、真田篤さん、後輩の北住祐一君に厚く御礼申し上げます。また本研究で開発したロボットの製作に協力してくれた本田君をはじめ、石井研究室の方々にも感謝の意を示します。

最後にこれまで私の成長を見守り、励まし、支えてくれた両親の西田健也や西田英代、姉の西田めぐみ、そして婚約者の松村菜穂子に感謝の意を込めて、謝辞と致します。

平成23年3月

西田 祐也

参考文献

- [1] 経済産業省, ロボット政策研究会中間帆酷暑(案)～ロボットで拓くビジネスフロンティア～, URL: <http://www.meti.go.jp/press/20050512004/robot-set.pdf>, 2005
- [2] 石原昇, 五内川拓史, ロボット・イノベーション, 日刊工業新聞社, 2007
- [3] 浮田宋伯, 「クオリティ・オブ・ライフのためのロボティクス」特集について, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.9, pp.1, 2010
- [4] 田所論, 平井成興, 浅間一, 菅野重樹, 吉瀬裕, 犬道武生, 水川真, 長谷川勉, 小管一弘, ロボティクスメカトロニクス, 日本機械学会誌, Vol.113, No.1101, pp.66-69, 2010
- [5] A.A.F. Nassiraei, Seiji Masakado, Takayuki Matsuo, Takashi Sonoda, Isao Takahira, Hajime Fukushima, Masayuki Murata, Kodai Ichikawa, Kazuo Ishii, Tsutomu Miki, Development of an Artistic Robot “Jumping Joe”, Proceedings of IEEE IROS’06, pp.1720-1725, 2006
- [6] A.A.F. Nassiraei, M. Murata, K. Ichikawa, K. Ichikawa, K. Ishii, Realization of the Rapid Movements for the Entertainment Robots by Using Two New Actuators “Inertia Actuator” & “Cam Charger”, Proceedings of ASME IMECE2006, IMECE2006-14257, 2006
- [7] ツカサ電工株式会社, 製品カタログ(出力13～17W 5スロット, 高い信頼性の高トルクモータ), URL:http://www.tsukasa-d.co.jp/motor/dc/tg_21/, 2010
- [8] 山海嘉之, 跳ぶロボット, バイオメカニズム学会誌, Vol.20, No.2, 1996
- [9] 松岡清利, 反復跳躍運動の機械モデル, バイオメカニズム 5, 東京大学出版会, pp.251-258, 1979
- [10] Raibert M. H., Dynamic stability and resonance in a one-legged hopping machine, In 4th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, Warsaw Polish Scientific Publications, pp.352-367, 1981
- [11] Raibert M. H., Special Issue on Legged Systems, International J. Robotics Research, Vol.3, pp.75-92, 1984
- [12] M. H. Raibert, Legged Robots That Balance, The MIT Press, 1986
- [13] Jessica Hodgins, Marc H. Raibert, Biped Gymnastics, MIT Press, Vol.4, pp.5-14, 1988
- [14] 谷和男, バネを利用した車輪型跳躍機械, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2), pp.611-612, 1990
- [15] 中野栄治, 大久保宏樹, 木村浩, 跳躍機械の着地制御, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.2, pp.169-176, 1991
- [16] 山藤和男, 三矢喜之, 跳躍移動ロボットの開発と運動制御, 日本機械学会論文集(C編), 57巻, 537号, pp.1616-1620, 1991
- [17] 金井宏樹, 山藤和男, 可変構造型移動ロボットの制御アーム 一脚が他における姿勢変化と跳躍動作一, 日本機械学会論文集(C編), 57巻, 539号, pp.2336-2341, 1991
- [18] 五関学, 山藤和男, 吉瀬裕, なわ跳びロボットの開発と運動制御, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2), pp.637-638, 1991

- [19] 我妻慶一, 嘉納秀明, エネルギー蓄積型跳躍機械, 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集(2), pp.635-636, 1991
- [20] Playter R.R., Raibert M. H., Control of a biped somersault in 3D, Proceedings of IROS'92V, 1992
- [21] Playter R. R., Raibert M. H., Generation of a somersault by a 3D biped robot, IFAC'92V, 1992
- [22] Kazuo Tani, Masahiko Shirai, A Jumping Machine Using the Energy Stored in Springs, IFToMM-jc International Symposium on Theory of Machines and Mechanisms, pp.265-270, 1992
- [23] Sankai Y., Shirai M., Yasuhara K., Neural Based Sensing and Control for One-Legged Robot, JASME ICAM'93, ADVANCED MECHATRONICS, pp.924-930, 1993
- [24] 白井雅彦, 渡辺健一, 山海嘉之, 一足跳躍ロボットの制御に関する研究, 第11回日本ロボット学会学術講演会, No.3, pp.1095-1098, 1993
- [25] 本多幸太郎, 佐野明人, 川名雄, 坂口正道, 古荘純次, 関節型四足ロボットによる跳躍相を含むバウンス歩行制御の実現, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.637-638, 1993
- [26] Sankai Y., Ohta M., A Basic Concept of Super Rabbit, RoManSy, Vol.9, pp.349-359, 1993
- [27] Sankai Y., A Biocybernetic System in the Artificial Organ Control and Bio-Robotics, Lecture Note of International Center of Biocybernetics, pp.66-99, 1994
- [28] 大久保宏樹, 中野栄二, 木村浩, 跳躍機械の2次元面内着地制御, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.8, pp.153-160, 1994
- [29] 大久保宏樹, 半田実, 中野栄二, 自己振動を利用した跳躍機械の構成, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1091-1092, 1995
- [30] Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, Yasuo, Kuniyoshi, Mowgli: A Bipedal Jumping and Landing Robot with an Artificial Musculoskeletal System, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation 2007 (ICRA 2007), pp.2546-2551, 2007
- [31] 9メートルの大ジャンプ! 跳躍ロボット「hopper」登場, マイコミジャーナル 2000/11/08 記事, URL:<http://journal.mycom.co.jp/news/2000/11/08/15.html>, 2000
- [32] Atsushi Yamada, Hiroshi Mameda, Hiromi Mochiyama, Hideo Fujimoto, A Compact Jumping Robot utilizing Snap-through Buckling with Bend and Twist, proceedings the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.389-394, 2010
- [33] 福岡泰宏, 木村浩, 4足ロボットの生物規範型不整地適応動作歩行: 自立型「鉄犬2」による野外歩行の実現, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.1, pp.138-154, 2007
- [34] 株式会社ロボガレージホームページ, URL: <http://www. robo-garage.com/top.html>
- [35] 坂井泰樹, 大島徹, 藤川智彦, 百生登, 鳥海清司, 神谷和秀, 二関節筋機構による動物規範型跳躍ロボット, Dynamics & Design Conference 2006, 549-1 – 549-4, 2006
- [36] 杉山勇太, 平井慎一, 柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍, 日本ロボット学会, Vol.24, No.3, pp.378-387, 2006

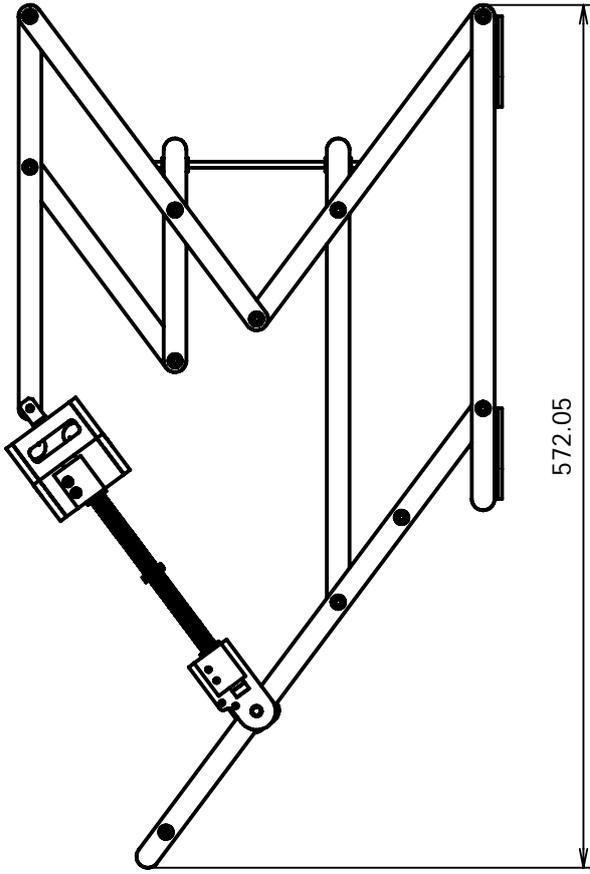
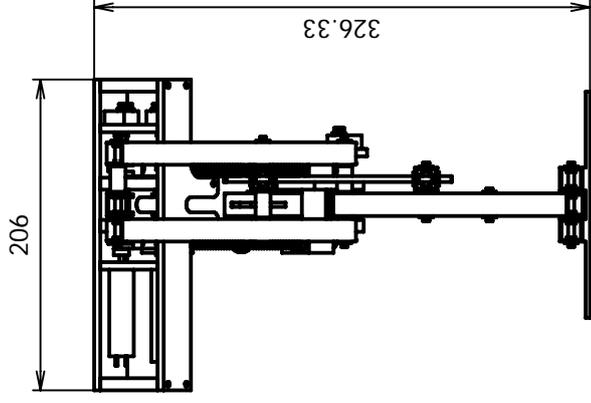
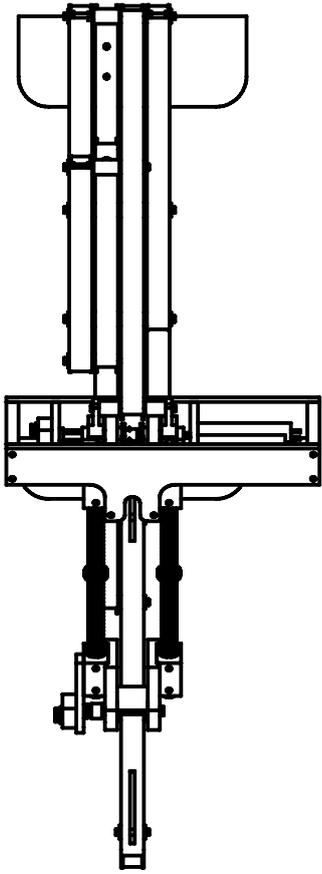
- [37] ワタリエイリ, 塚越秀行, 北川能, ロボットの投擲・跳躍能力を高める磁性ブレーキシリンダ, 日本ロボット学会, Vol.28, No.1, pp.95-105, 2010
- [38] Marc Raibert, Kevin Blankespoor, Gabriel Nelson, Rob Playter, the BigDog Team, BigDog: the Rough-Terrain Quadruped Robot, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, pp.10822-10825, 2008
- [39] Fumitaka kikuchi, Yusuke Ota, Shigeo Hirose, Basic Performance Experiments for jumping Quadruped, Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and System (IROS 2003), pp.3378-3383, 2003
- [40] 高橋, 小金沢, 把持物なじみ機能を有する人工指, 第4回計測自動制御学会 SI 部門 学術講演会予稿集, pp.271-272, 2003
- [41] K. Koganezawa, Artificial Finger with Shape-fitting Mechanism, Proceedings of International Conference of Intelligent Manipulation and Grasping, pp.103-109, 2004
- [42] Harada Electric Industry Co., Myo-electric controlled forearm prosthesis SH-1, URL <http://www.h-e-i.co.jp>
- [43] 石塚, 小金沢, 把持物なじみ機構と3自由度駆動を可能とする DPGS を搭載した指とハンドの開発, 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2006
- [44] W.T. Townsend, The BarrettHand grasper-programmably flexible part handling and assembly, Industrial Robot, Vol.27, No.3, pp.181-188, 2000
- [45] J. Butterfab, M. Grebenstein, H. Liu, G. Hirzinger, DLR-Hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.109-114, 2001
- [46] A. Namiki, Y. Imaki, M. Ishikawa, M. Kaneko, Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching, Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2666-2671, 2003
- [47] G. Hirzinger, J. Butterfab, M. Fischer, M. Grebenstein, M. Hahnle, H. Liu, I. Schaefer, N. Sporter, A Mechatronics Approach to the Design of Light-Weight Arms and Multifingered Hands, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.46-54, 2000
- [48] S.C. Jacobsen, E. K. Iversen, D. F. Knutti, R. T. Johnson, K. B. Biggers, Design of the UTAH/M.I.T. Dextrous Hand, Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.3, pp.1520-1532, 1986
- [49] N. Fukaya, S. Toyama, T. Asfour, R. Dillmann, Design of the TUAT/Karlsruhe Humanoid Hand, Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, pp.1754-1759, 2000
- [50] D. D. Wilkinson, V. Weghe, Y. Matsuoka, An Extensor Mechanism for and Anatomical Robot Hand, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.236-243, 2003
- [51] N. Dechev, W. L. Cleghorn, S. Naumann, Thumb Design of an Experimental Prosthetic Hand, Proceedings of the 2nd International Symposium on Robotics and Automation, 2000
- [52] Koichi Koganezawa, Yasutaka Ishizuka, Novel mechanism of artificial finger using double planetary gear system, Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and System (IROS 2008), pp.22-26, 2008

- [53] 高木健, 小俣透, 大きな把持力が得られる直動機構, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.2, pp.299-305
- [54] Takeshi Takaki, Toru Omata, High Performance Anthropomorphic Robot Hand with Grasp Force Magnification Mechanism, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2009), pp.1697-1703, 2009
- [55] 高木健, 小俣透, ロボットハンドのための負荷感応無段変速機, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.2, pp.238-244, 2005
- [56] 高木健, 小俣透, 負荷感応無段変速機を用いた 100[g]・100[N]指の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.2, pp.263-269, 2006
- [57] 山田篤史, 渡正充, 望山洋, 藤本英雄, 高剛性受動関節を有する閉ループ柔軟カタパルトと遊泳ロボットへの応用, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.10, pp.1144-1153, 2009
- [58] Marsh R. L., Jumping ability of anuran amphibians, In Advances in Veterinary Science and Comparative Medicine, Vol.38B, pp.51-111, 1994
- [59] 東昭, 生物の動きの事典, 株式会社朝倉書店, 1997
- [60] How Grasshopper Jump, URL:<http://www.st-andrews.ac.uk/~wjh/jumping/index.html>
- [61] Thomas A. McMahon, John Tyler Bonner 著, 木村武二 訳, 生物の大きさとかたち-サイズの生物額-, (株)東京科学同人, 2000
- [62] Thomas J. Roberts, Richard L. Marsh, Probing the limits to muscle-powered accelerations: lessons from jumping bullfrogs, Journal of Experimental Biology, Vol.206, No.15, pp.2567-2580, 2003
- [63] W. Gronenberg, Fast actions in small animals: springs and click mechanisms, Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, Vol.178, No.6, pp.467-472, 2007
- [64] 樋口憲生, 李哲鎬, 加納明彦, 湯浅景元, 垂直跳びにおける前伸長の速さ・強さが跳躍高におよぼす効果, 中京大学体育学論叢, Vol.28, No.1, pp59-64, 1986
- [65] 金子潤, 竹下香寿美, 川上泰雄, 福永哲夫, 垂直跳びにおいて重りを持つことが跳躍動作に及ぼす影響, スポーツ科学研究, Vol.2, pp.63-71, 2005
- [66] Mirko Kovac, Martin Fuchs, Andre Guignard, Jean-Christophe Zufferey, Dario Floreano, A miniature 7g jumping robot, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008), pp.373-378
- [67] Mirko Kovac, Manuel Schlegel, Jean-Christophe, Dario Floreano, A Miniature Jumping Robot with Self-Recovery Capabilities, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.583-588
- [68] 三浦宏文, 高信英明, 内田千春, 野浦康司, コオロギを規範とした跳躍ロボットの研究, 工学院大学研究報告, 97号, pp.1-8, 2004
- [69] 高信英明, 明賀秀行, 吉澤宏和, 鈴木健司, 三浦宏文, コオロギ型跳躍ロボットの研究, 工学院大学研究報告, 101号, pp.17-23, 2006

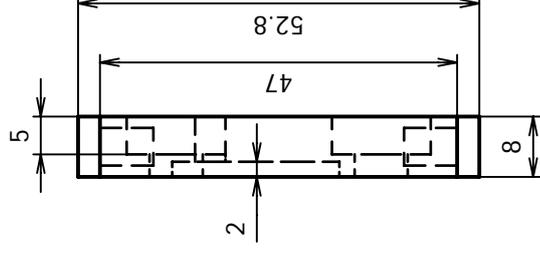
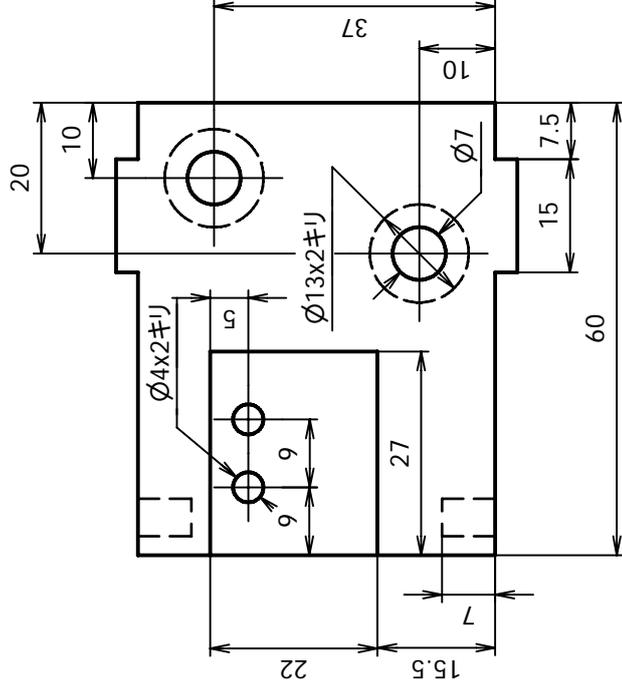
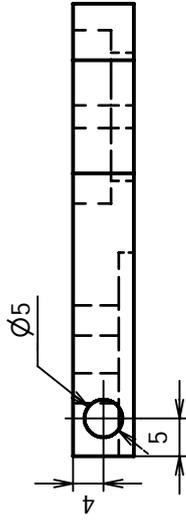
- [70] 広瀬茂男, 生田幸士, 梅谷陽二, 形状記憶合金アクチュエータの開発 (性能評価とその新構成法の導入), 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.2, 1985
- [71] 東森充, 石井抱, 金子真, 無次元解析に基づくなぞり型脚式ロボットの設計, 日本機械学会論文集, 71 巻, 704 号, pp.230-236, 2005
- [72] 西田祐也, 園田隆, 石井和男, 2 質点跳躍モデルにおけるパラメータ設計指針に関する基礎研究, ロボティクスメカトロニクス講演会 2009, 2P1-C03, 2009
- [73] Yuya Nishida, Takashi Sonoda, Kazuo Ishii, Design Principle of Jumping Robot in Two-mass System Proceedings of The 9th POSTECH-KYUTECH Joint Workshop on Neuroinformatics, pp.30-31, 2009
- [74] 西田祐也, 園田隆, 石井和男, 2 質点モデルにおける跳躍ロボットの設計指針, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会概要集, 3P1-05, 2009
- [75] Yuya Nishida, Takashi Sonoda, Kazuo Ishii, Design Principle of Two-mass Jumping System, Proceedings of IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics (SMC2009), p1023, 2009
- [76] Yuya Nishida, Takashi Sonoda, Kazuo Ishii, An Index Parameter “Power Mass Ratio” to Evaluate Two-mass Jumping System, Proceedings of East-Asia Inter-University Workshop on Brain Engineering 2010 (EAW'10), pp.157-169
- [77] 大久保宏樹, 中野栄二, 木村浩, ばねとアクチュエータによる跳躍機械の構成法, 日本ロボット学会, Vol.10, No.7, pp.948-954, 1992
- [78] 中野栄二, 大久保宏樹, 跳躍ロボット全般, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3, 1993
- [79] 小出昭一郎, 物理学, 株式会社裳華房, 1975
- [80] ポイントを学ぶ 材料力学, 西村尚 編著, 丸善株式会社, 1988
- [81] Maxon motor ホームページ, <http://www.maxonjapan.co.jp/index.htm>
- [82] Faulhaber ホームページ, <http://www.faulhaber-group.com/>
- [83] 西田祐也, 園田隆, 石井和男, リンク機構を用いた高出力関節機構の提案, ロボットメカトロニクス講演会予稿集, 3N2-1, 2010
- [84] 西田祐也, 園田隆, 石井和男, ヤコビ行列を用いた高出力関節機構の解析, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3N2-1, 2010
- [85] Yuya Nishida, Takashi Sonoda, Kazuo Ishii, Analysis of High Power Joint Mechanism using Jacobian Matrix, Proceedings of The 10th POSTECH-KYUTECH Joint Workshop on Neuroinformatics, pp.25-26, 2010
- [86] Yuya Nishida, Takashi Sonoda, Kazuo Ishii, High Power joint mechanism Imitating Locust Leg Structure, Proceedings of World Automation Congress 2010 (WAC2010), ISORA629, 2010
- [87] Yuya Nishida, Takashi Sonoda, Kazuo Ishii, Jacobian Matrix Derived From Cross Product and Its Application into High Power Joint Mechanism Analysis, Journal of Bionic Engineering, Vol.7, Suppl., pp.218-223, 2010

- [88] Roger D. Santer, Yoshifumi Yamawaki, F. Claire Rind, Pater J. Simmons, Motor activity and trajectory control during escape jumping in the locust *Locusta migratoria*, Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural and Behavioral Physiology, Vol.191(10), pp.965-975, 2005
- [89] HC Bannet Clark, The energetic of the jump of the locust *Schistocerca gregaria*, Journal of Experimental Biology, Vol.63, pp.53-83, 1975
- [90] W.J. Heitler, The locust jump, Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural and Behavioral Physiology, Vol.89(1), pp.93-104, 1974
- [91] 社団法人日本機械学会 編著, マルチボディダイナミクス (1) ー基礎理論ー, 株式会社コロナ社, 2006
- [92] 田島洋, マルチボディダイナミクスの基礎, 東京電機大学出版局, 2006
- [93] 広瀬茂男, ロボット工学 ー機械システムのベクトル解析ー, 株式会社裳華房, 1987

Appendix



題目	High power joint mechanism	尺度	1:5	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Leg-v03.iam	図番	1	材質	
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		



題目

High power joint

尺度

1:1

投影法

三角法

図名

HPJ-v01-Drive-Plate-01-L-v03.ipt

図番

2

材質

ABS Plastic

学校

九州工業大学

専攻

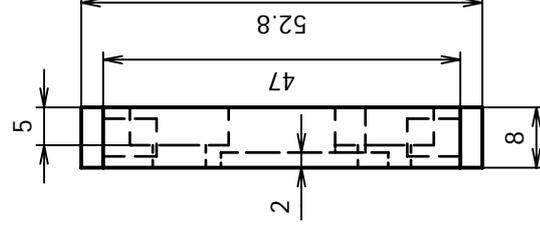
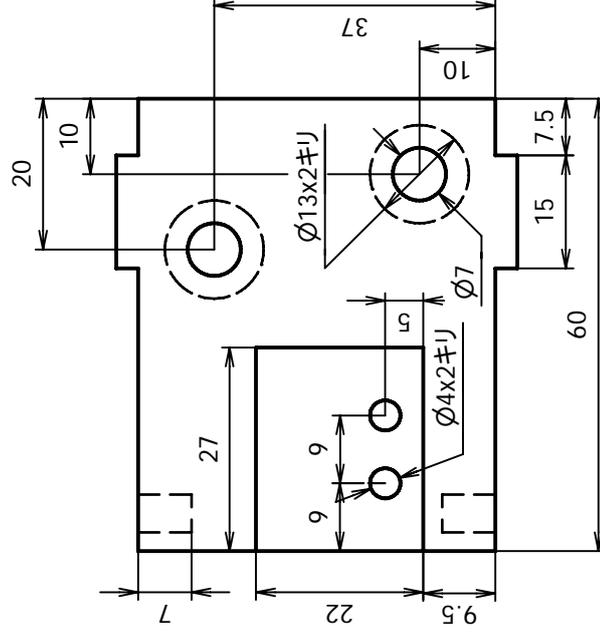
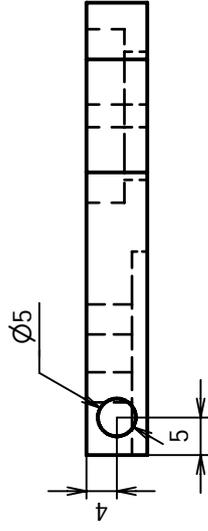
脳情報専攻

所属

石井研究室

氏名

西田 祐也



題目

High power joint

尺 度

1:1

投 影 法

三 角 法

図 名

HPJ-v01-Drive-Plate-01-R-v03.ipt

図 番

3

材 質

ABS Plastic

学 校

九州工業大学

専 攻

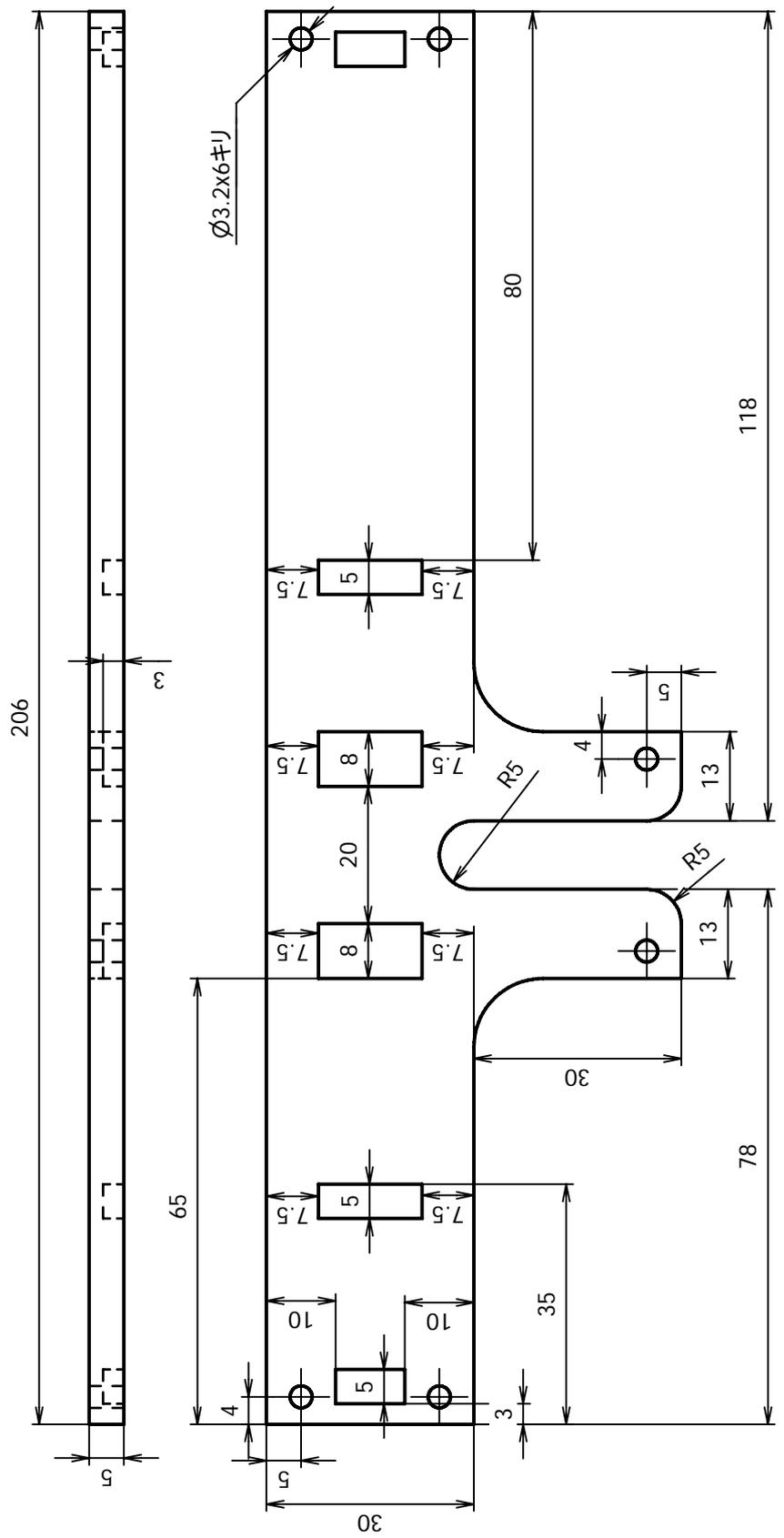
脳情報専攻

所 属

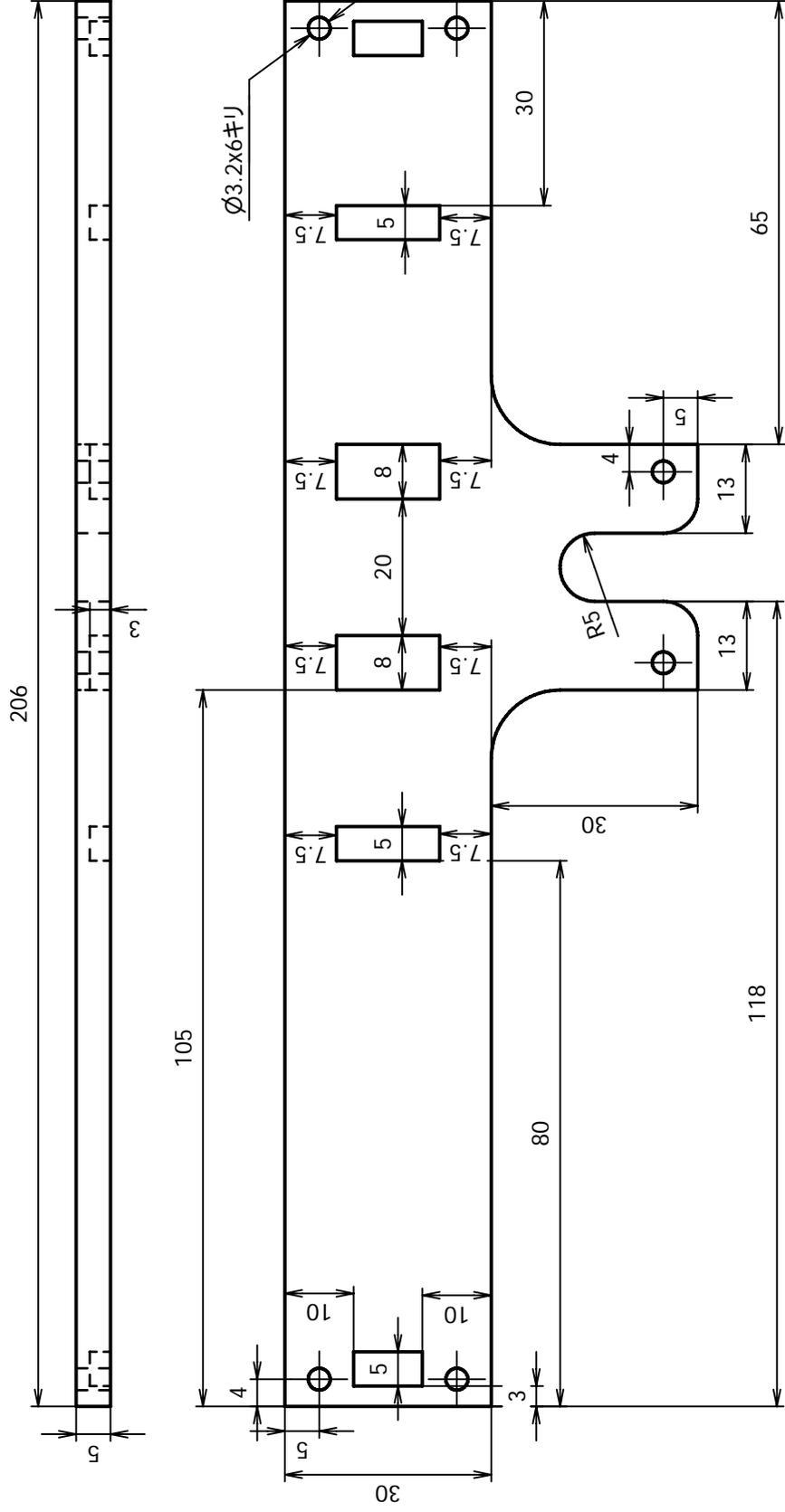
石井研究室

氏 名

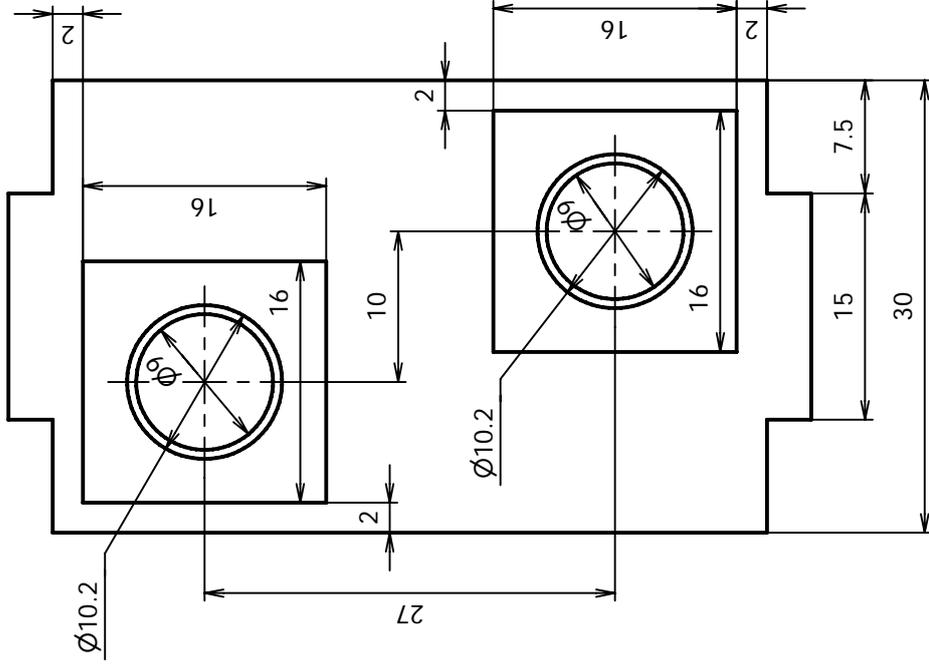
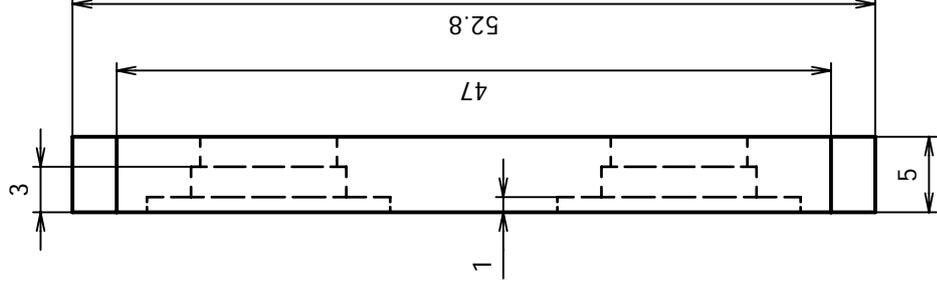
西田 祐也



題目	High power joint	尺度	1:1	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Drive-Plate-02-B-v02.ipt	図番	4	材質	ABS Plastic
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		



題目	High power joint	尺度	1:1	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Drive-Plate-02-T-v02.ipt	図番	5	材質	ABS Plastic
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		



題目

図名

学校

所属

尺

度

図

番

専

攻

氏

名

三角法

材

質

2:1

7

ABS Plastic

脳情報専攻

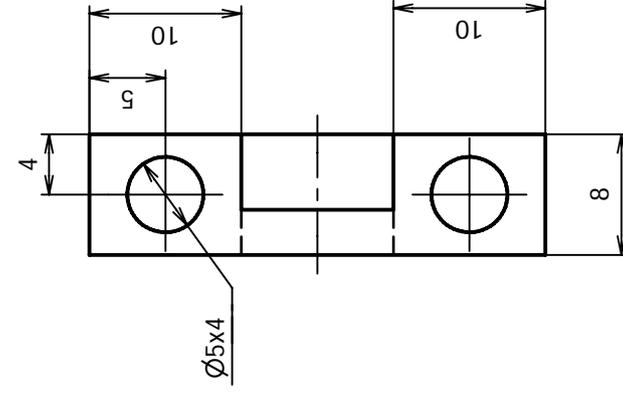
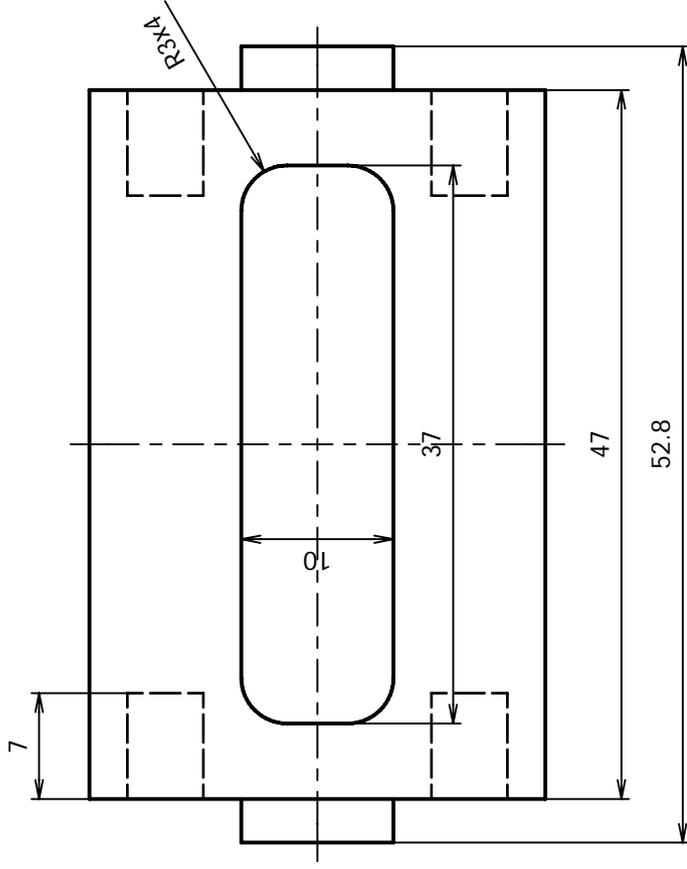
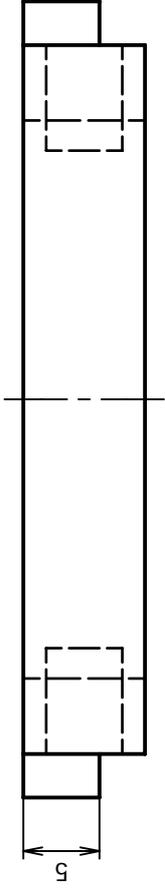
西田 祐也

High power joint

HPJ-v01-Drive-Plate-04-v01.ipt

九州工業大学

石井研究室



題目

High power joint

尺度

2:1

投影法

三角法

図名

HPJ-v01-Drive-Plate-05-v01.ipt

図番

8

材質

ABS Plastic

学校

九州工業大学

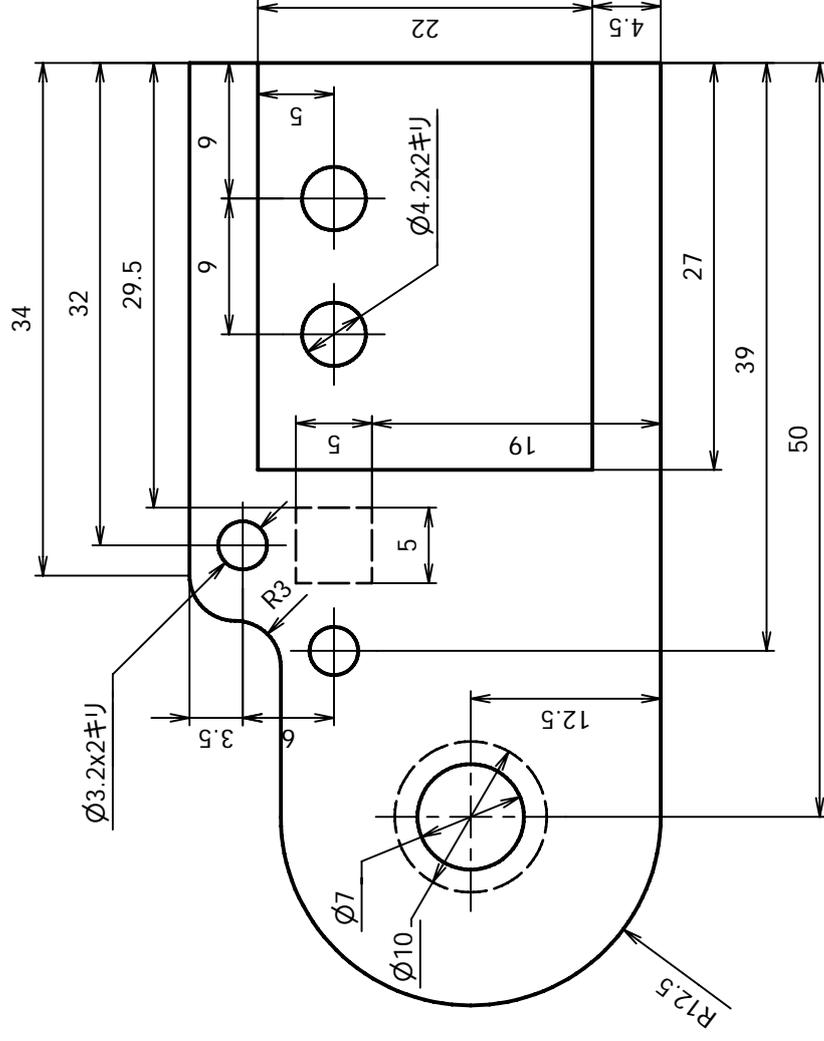
専攻

脳情報専攻

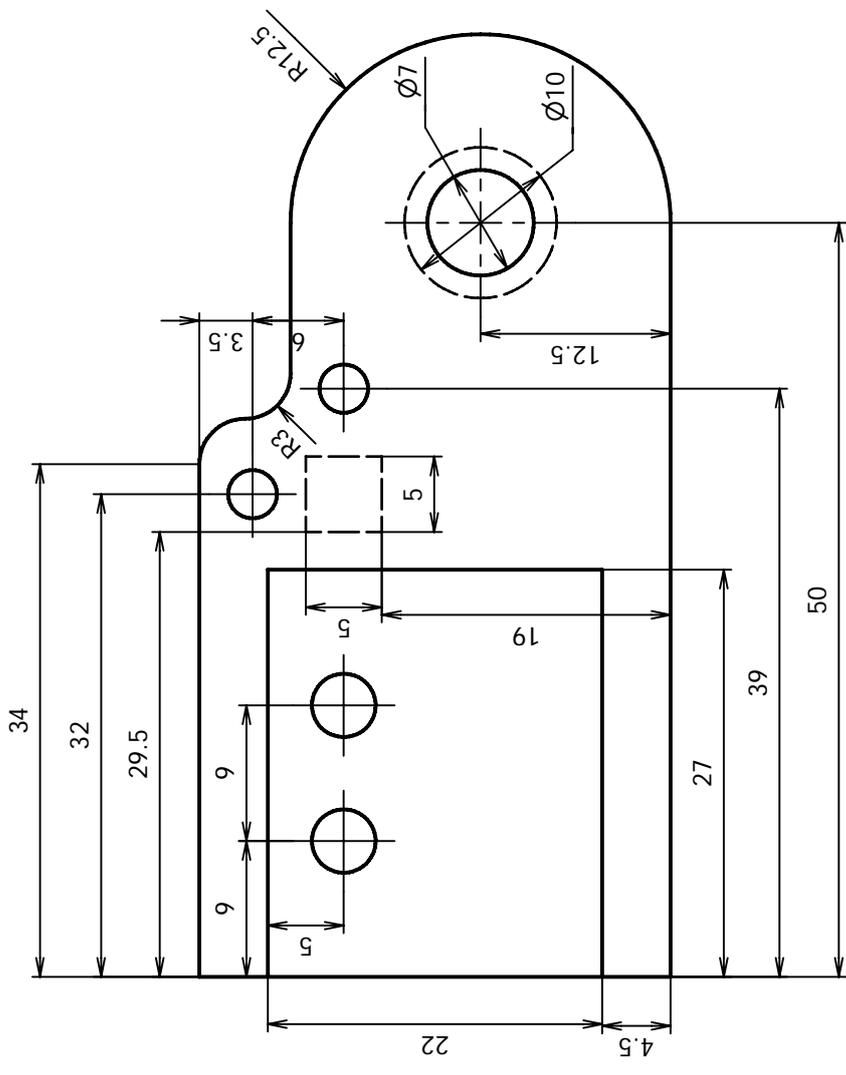
氏名

石井研究室

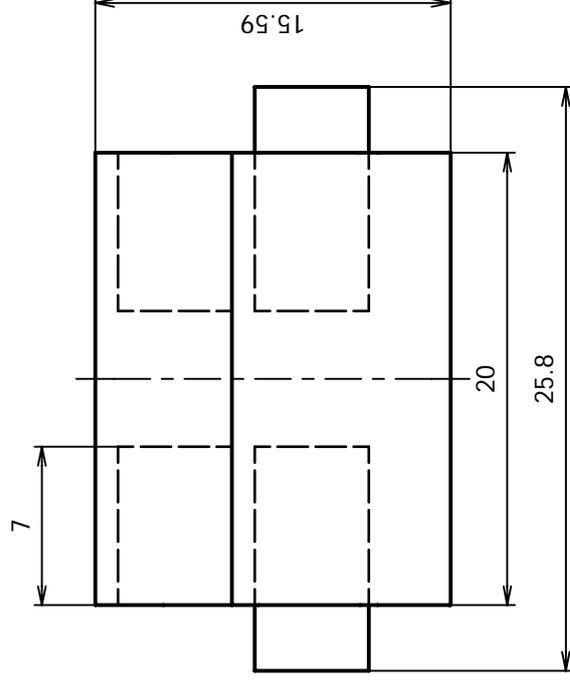
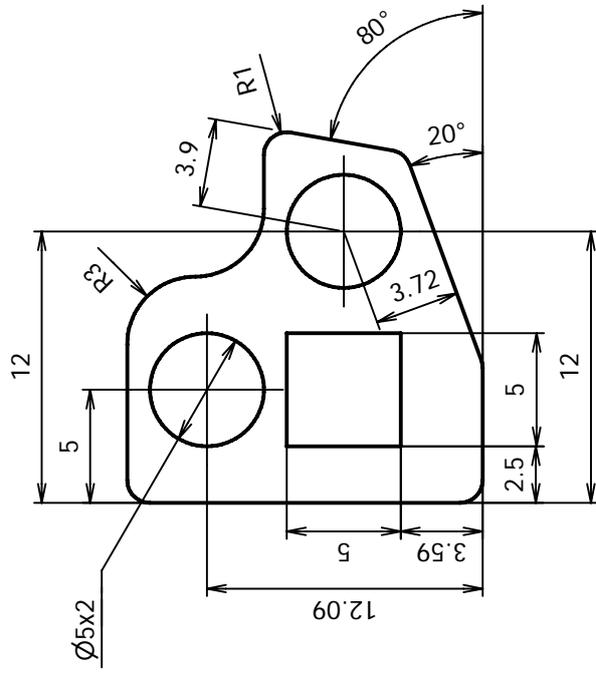
西田 祐也



題目	High power joint	尺度	1:2	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Drive-Plate-06-L-v02.ipt	図番	9	材質	ABS Plastic
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		



題目	High power joint	尺度	2:1	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Drive-Plate-06-R-v02.ipt	図番	10	材質	ABS Plastic
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		



A-11

題目

High power joint

尺度

3:1

投影法

三角法

材質

図名

HPJ-v01-Drive-Plate-07-v01.ipt

図番

11

専攻

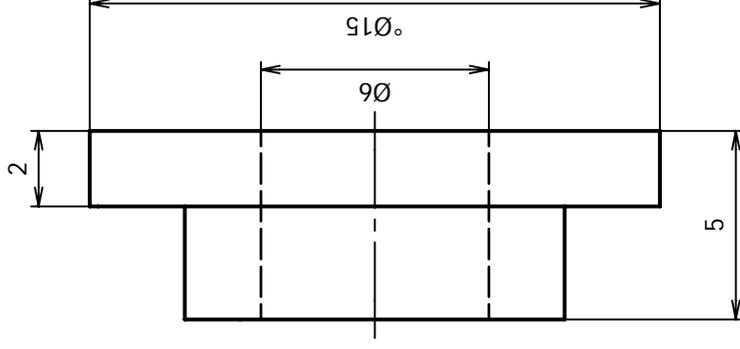
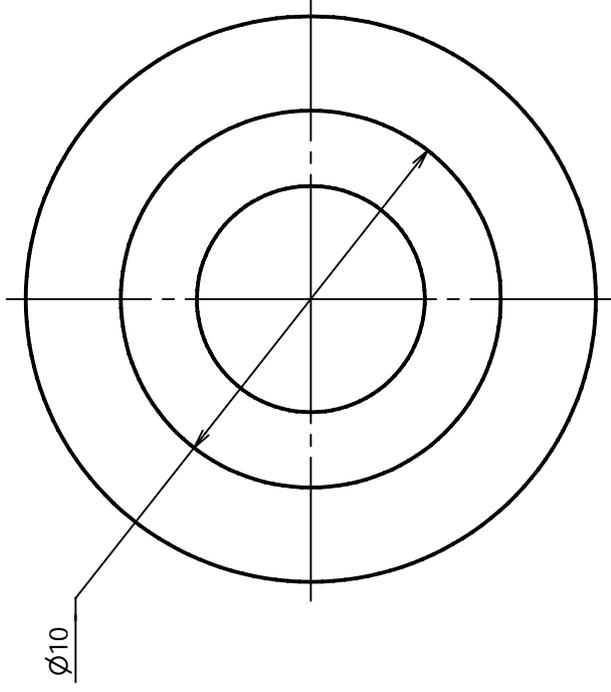
九州工業大学

脳情報専攻

氏名

石井研究室

西田 祐也



A-12

題目

High power joint

尺度

5:1

投影法

三角法

図名

HPJ-v01-Drive-Pully-01-v01.ipt

図番

12

材質

ABS Plastic

学校

九州工業大学

専攻

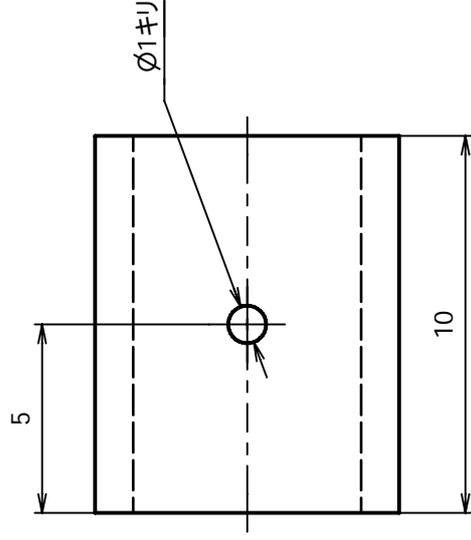
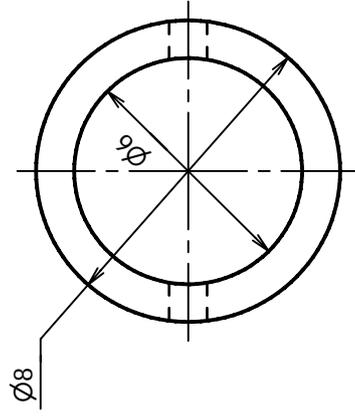
脳情報専攻

所属

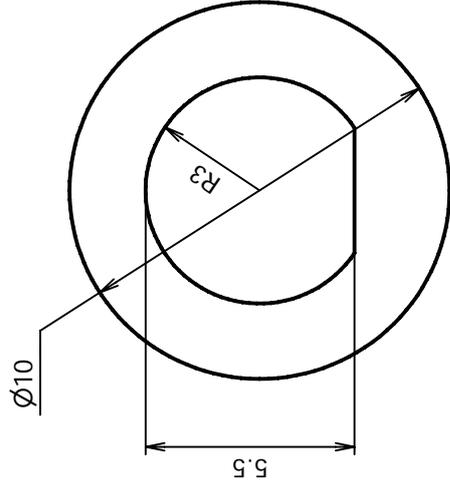
石井研究室

氏名

西田 祐也

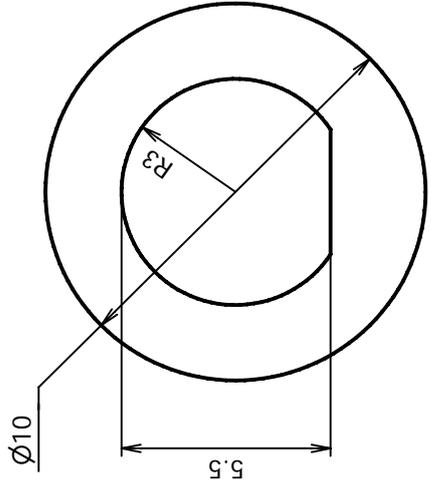


題目	High power joint	尺度	5:1	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Drive-Pully-02-v01.ipt	図番	13	材質	ABS Plastic
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		



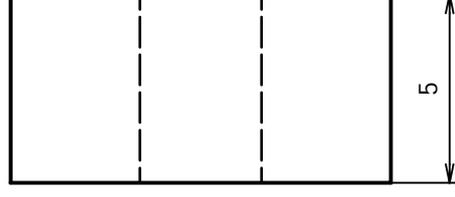
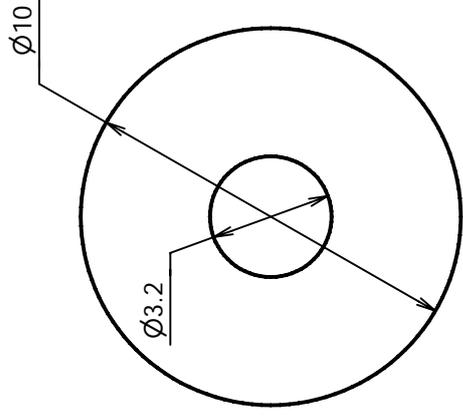
A-14

題目	Hihg power joint		尺度	5:1	三角法
図名	HPJ-v01-Circuit-Coupling--v01.ipt		図番	14	材質
学校	九州工業大学		専攻	脳情報専攻	
所属	石井研究室		氏名	西田 祐也	
					ABS Plastic



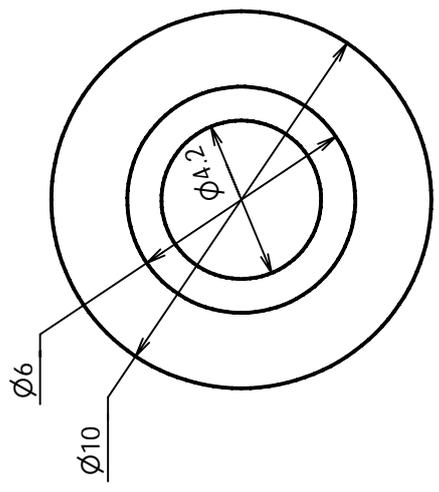
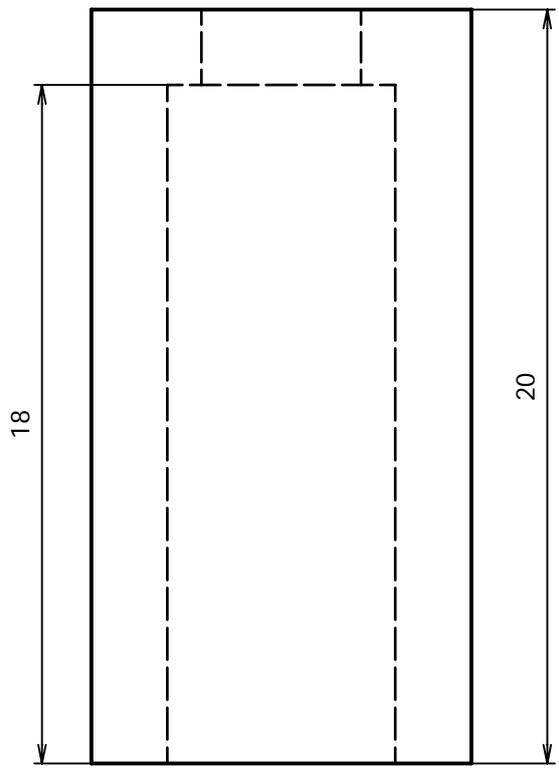
A-15

題目	High power joint	尺度	5:1	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Drive-Coupling-02-v01 .ipt	図番	15	材質	ABS Plastic
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		

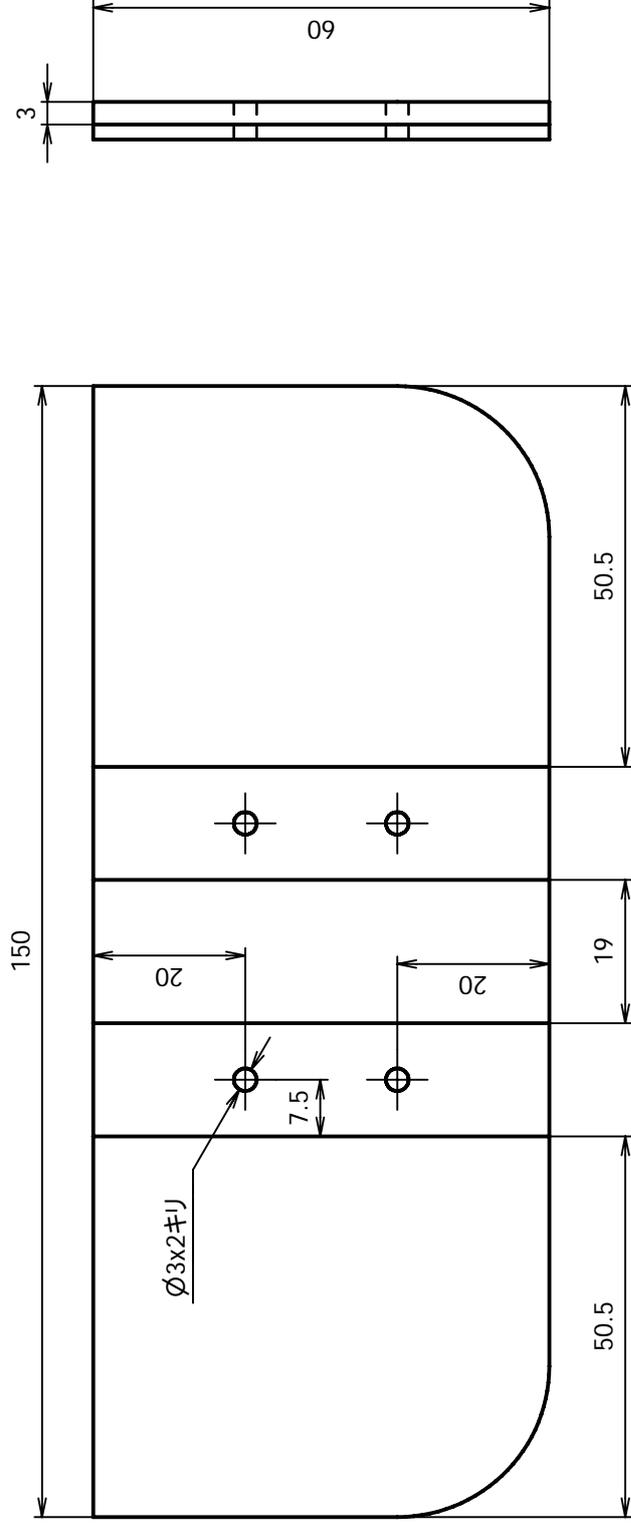


A-16

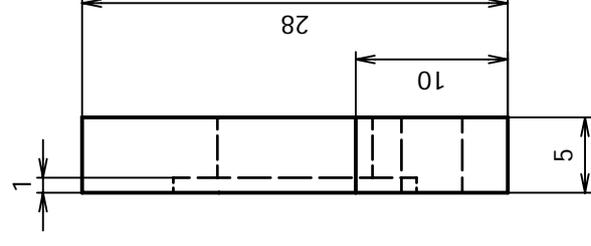
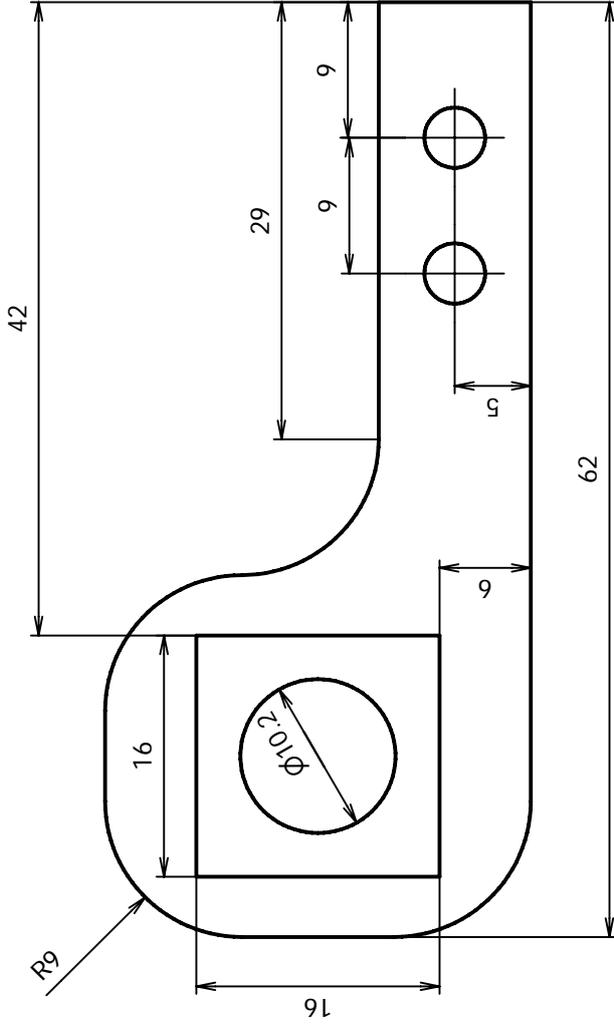
題目	Hihg power joint	尺度	5:1	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Drive-Stopper-01-v01.ipt	図番	16	材質	ABS Plastic
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		



題目	High power joint	尺度	5:1	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Drive-Stopper-02-v01.ipt	図番	17	材質	ABS Plastic
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		



題目	High power joint	尺度	1:1	投影法	三角法
図名	HPJ-v01-Frame-Plate-01-v01 .ipt	図番	18	材質	ABS Plastic
学校	九州工業大学	専攻	脳情報専攻		
所属	石井研究室	氏名	西田 祐也		



題目

High power joint

尺度

2:1

投影法

三角法

図名

HPJ-v01-Frame-Plate-02-v01 .ipt

図番

19

材質

ABS Plastic

学校

九州工業大学

専攻

脳情報専攻

所属

石井研究室

氏名

西田 祐也