

博士学位論文

人と共存するロボットのためのアーム機構と  
安全性評価手法の研究

中本秀一

2017年9月

芝浦工業大学大学院理工学研究科

機能制御システム専攻



# 目次

## 第1章 序論

- 1.1 研究背景 . . . . . 1
- 1.2 本研究の目的 . . . . . 6
- 1.3 本研究の対象と方法 . . . . . 6
- 1.4 本論文の構成 . . . . . 8

## 第2章 ロボットアーム機構の安全に関する質量特性評価手法の提案

- 2.1 ロボットアームの安全性評価の動向と接触安全性の定量化 . . . . . 10
- 2.2 アーム機構の安全性に関する質量特性評価手法 . . . . . 12
- 2.3 安全に関する質量特性評価手法の提案のまとめ . . . . . 21

## 第3章 モータ関節配置型アームの開発と問題点

- 3.1 モータ関節配置型アームの機構 . . . . . 22
- 3.2 モータ関節配置型アームの質量特性評価 . . . . . 26
- 3.3 モータ関節配置型アームの課題と新規アームの設計方針 . . . . . 31
- 3.4 モータ関節配置型アームの開発と問題点のまとめ . . . . . 32

## 第4章 ワイヤ駆動アームの開発

- 4.1 ワイヤ駆動アーム開発の目的 . . . . . 33
- 4.2 ワイヤ駆動アームの機構 . . . . . 35
- 4.3 ワイヤ張力自動調整機構 . . . . . 39
- 4.4 ワイヤ駆動アームの制御 . . . . . 45
- 4.5 ワイヤ駆動アームの安全に関する特性評価 . . . . . 48
- 4.6 ワイヤ駆動アームのまとめ . . . . . 49

## 第5章 3次元重力補償アームの開発

- 5.1 3次元重力補償アーム開発の目的 . . . . . 50
- 5.2 3次元重力補償機構 . . . . . 52
- 5.3 3次元重力補償機構のアーム設計への適用 . . . . . 55
- 5.4 手先負荷に応じた補償力補償 . . . . . 61

5.5	6自由度アームへの拡張	63
5.6	3次元重力補償アームの安全に関する特性評価	64
5.7	3次元重力補償アームのまとめ	65
<b>第6章 下面支持ハンド搭載アームの開発</b>		
6.1	下面支持ハンド搭載アーム開発の目的	66
6.2	食器類把持のための下面支持ハンド機構	68
6.3	下面支持ハンド搭載アームシステム設計	70
6.4	下面支持ハンドの把持安定性の解析	73
6.5	下面支持ハンドのトルク軽減効果の検証	76
6.6	食器ハンドリング実験	79
6.7	下面支持ハンド搭載アームの安全に関する特性評価	82
6.8	下面支持ハンド搭載アームのまとめ	84
<b>第7章 各アームの安全に関する特性評価</b>		
7.1	各アームの機構と安全性の評価	85
7.2	ワイヤ駆動アームの質量特性	86
7.3	重力補償アームの質量特性	90
7.4	下面支持ハンド搭載アームの質量特性	95
7.5	各アームの質量特性比較	99
<b>第8章 結論と今後の展望</b>		
8.1	結論	101
8.2	今後の課題と展望	103
研究業績		104
謝辞		106
参考文献		108

# 目 次

## 第 1 章 序論

Fig.1.1	Function to ensure robot safety	3
Fig.1.2	Example of Mobile Robot	5
Fig.1.3	Flow of this Research	9

## 第 2 章 ロボットアーム機構の安全に関する質量特性評価手法の提案

Fig.2.1	Parameter of the arm	13
Fig.2.2	Contact Situation	15
Fig.2.3	2 Link arm in the plane	15
Fig.2.4	Generalised Inertia Ellipsoid	16
Fig.2.5	Virtual Mass	17
Fig.2.6	Distribution of Max Virtual Mass	17
Fig.2.7	Singular Point of the Arm	18
Fig.2.8	An example of the safety value of the robot arm when it contacts the upper arm	19
Fig.2.9	An example of the safety value of the robot arm when it contacts the face	19
Fig.2.10	Max Velocity	20

## 第 3 章 モータ関節配置型アームの開発と問題点

Fig.3.1	Door Opening	23
Fig.3.2	Handling	23
Fig.3.3	Picking up	23
Fig.3.4	The store state in the robot body and the movable range	23
Fig.3.5	Arm mechanism	24
Fig.3.6	The scene that the robot finds a person and grasps a plastic bottle	25
Fig.3.7	The scene that the robot finds a person and takes a plastic bottle to him	25

Fig.3.8	The scene that the robot finds a trash can and goes to throw away a plastic bottle	26
Fig.3.9	Link Parameter	26
Fig.3.10	Virtual Mass	29
Fig.3.11	Max velocity (upper arm)	30
Fig.3.12	Max velocity (upper face)	30
Fig.3.13	Evaluation result (upper arm)	30
Fig.3.14	Evaluation result (face)	30

#### 第4章 ワイヤ駆動アームの開発

Fig.4.1	The wire-driven arm	33
Fig.4.2	Outline of arm mechanism	36
Fig.4.3	Path of the wire	36
Fig.4.4	Mobile robot equipped with wire-driven arm	37
Fig.4.5	Manipulability of wire-driven arm	37
Fig.4.6	Motion of the arm	38
Fig.4.7	Experiment of Handling a Cup	38
Fig.4.8	Outline of the mechanism	39
Fig.4.9	Motion of the mechanism	40
Fig.4.10	Model of the mechanism	42
Fig.4.11	Simulation results of the speed of each pulley	42
Fig.4.12	Simulation results of the angle of each pulley	43
Fig.4.13	Simulation results of the tension of the wire	43
Fig.4.14	Basic experiment device	44
Fig.4.15	Experimental results of the tension of the wire	44
<b>Fig.4.16</b>	<b>Pulley Diameter</b>	<b>45</b>
Fig.4.17	Position control result (Joint No.6)	46
Fig.4.18	Block diagram of joint angle position controller with motor torque compensation	47

#### 第5章 3次元重力補償アームの開発

Fig. 5.1	Modeling of the weight compensation	53
Fig. 5.2	Modeling of the gravity compensation mechanism	55
Fig. 5.3	The design of the arm equipped with a gravity compensation Mechanism	56
Fig. 5.4	The arm equipped with a gravity compensation mechanism	56
Fig. 5.5	The arm equipped with a gravity compensation mechanism	56

Fig. 5.6 Gravity compensation using a wire pulley and the most suitable compensation force	58
Fig. 5.7 Gravity compensation using a wire pulley and the most suitable compensation force	59
Fig. 5.8 The effect of the gravity compensation of the torque total of each joint to the arm posture	60
Fig. 5.9 Simulation result and experimental result of the torque total of each joint to the arm posture	61
Fig.5.10 The relationship between payload and additional compensation force and total torque of joint	62
Fig.5.11 Simulation result and experimental result of the total torque on the additional compensation force	62
Fig.5.12 A design of the 6 degree of freedom arm equipped with gravity compensation mechanism	63

## 第6章 下面支持ハンド搭載アームの開発

Fig.6.1 A scene and image of service robot for tableware handling	67
Fig.6.2 Various tableware handling	67
Fig.6.3 The sequence of grasping a dish	69
Fig.6.4 The mechanism outline figure of a system	71
Fig.6.5 Details in hand part	71
Fig.6.6 The pattern of grasping tableware	72
Fig.6.7 The arm for handling tableware	72
Fig.6.8 The mobile robot for handling tableware	72
Fig.6.9 The coordinate system of grasping a plate	74
Fig.6.10 Admissible external force set	75
Fig.6.11 Stability by the position of the tip of plate	75
Fig.6.12 The type of two arms	77
Fig.6.13 The map of the total torque	78
Fig.6.14 The map of the ratio of total torque	78
Fig.6.15 Experimental result of grasping a dish	80
Fig.6.16 The experimental result of grasping a dish	80
Fig.6.17 The result of grasping and handling a tray	81
Fig.6.18 The result of grasping a cylindrical object	81
Fig.6.19 The result of grasping a box	82

## 第7章 各アームの安全に関する質量特性評価

Fig.7.1	Link Parameter	86
Fig.7.2	Virtual Mass	88
Fig.7.3	Max Velocity (upperarm)	88
Fig.7.4	Max Velocity (face)	88
Fig.7.5	Evaluation result (upper arm)	88
Fig.7.6	Evaluation result (face)	88
Fig.7.7	Simulation result	89
Fig.7.8	Features of the mechanism and its effect	89
Fig.7.9	Link Parameter	90
Fig.7.10	Virtual Mass	89
Fig.7.11	Max Velocity (upperarm)	93
Fig.7.12	Max Velocity (face)	93
Fig.7.13	Evaluation result (upper arm)	93
Fig.7.14	Evaluation result (face)	93
Fig.7.15	Simulation result	94
Fig.7.16	Features of the mechanism and its effect	94
Fig.7.17	Link Parameter	95
Fig.7.18	Virtual Mass	97
Fig.7.19	Max Velocity (upperarm)	97
Fig.7.20	Max Velocity (face)	97
Fig.7.21	Evaluation result (upper arm)	97
Fig.7.22	Evaluation result (face)	97
Fig.7.23	Simulation result	98
Fig.7.24	Features of the mechanism and its effect	99
Fig.7.25	Simulation result of All Arms	100



# 表 目 次

## 第 1 章 序論

Table 1.1	Feature of Each Mechanism	7
-----------	---------------------------	---

## 第 2 章 ロボットアーム機構の安全に関する質量特性評価手法の提案

Table 2.1	Characteristics of the body parts (ISO/TS 15066)	11
-----------	--	----

## 第 3 章 モータ関節配置型アームの開発と問題点

Table 3.1	Specification detail of the arm	24
-----------	---------------------------------	----

Table 3.2	Design Spec of Arm	31
-----------	--------------------	----

## 第 4 章 ワイヤ駆動アームの開発

Table 4.1	Design Spec of Wire Arm	33
-----------	-------------------------	----

Table 4.2	Relationship between Mechanical Features and Safety Measure Items	33
-----------	--	----

Table 4.3	Experimental results compared the settling time (Joint No.6)	47
-----------	--	----

Table 4.4	Wire-driven type vs actuator mounted type	48
-----------	---	----

Table 4.5	Relationship between Proposed Mechanism and Mechanical Safety Measure	49
-----------	--	----

## 第 5 章 3次元重力補償アームの開発

Table 5.1	Design Spec of Gravity Compensation Arm	50
-----------	---	----

Table 5.2	Relationship between Mechanical Features and Safety Measure Items	51
-----------	--	----

Table 5.3	Specification of the arm	57
-----------	--------------------------	----

Table 5.4	Specification of the 6DOF arm	63
-----------	-------------------------------	----

Table 5.5	Gravity compensation type vs actuator mounted type	64
-----------	--	----

Table 5.6	Relationship between Proposed Mechanism and Mechanical Safety Measure	65
-----------	--	----

## 第 6 章 下面支持ハンド搭載アームの開発

Table 5.1	Design Spec of Under Supporting Extension Hand	67
-----------	--	----

Table 6.2	Relationship between Mechanical Features and Safety Measure Items . . . . .	68
Table 6.3	Under Supported Extension Type vs Actuator Mounted Type . . . . .	83
Table 6.4	Relationship between Proposed Mechanism and Mechanical Safety Measure . . . . .	83

**第 7 章 各アームの安全に関する質量特性評価**

Table 7.1	Relationship between Proposed Mechanism and Mechanical Safety Measure . . . . .	85
Table 7.2	Simulation Result . . . . .	89
Table 7.3	Simulation Result . . . . .	94
Table 7.4	Simulation Result . . . . .	98
Table 7.5	Simulation Result of All Arms . . . . .	99

# 記号表

記号	説明	単位
<b>第2章</b>		
$F_{\max}$	接触許容力	N
$E_{\max}$	接触許容エネルギー	J
$k$	有効弾性係数	N/m
$m_H$	有効質量	kg
$v$	アームの接触点と人体の接触部位との相対速度	m/s
$m_R$	アームの接触点の質量	kg
$E_R$	接触伝達エネルギー	J
$\mu$	換算質量	kg
$E_{R\max}$	最大接触伝達エネルギー	J
$r_E$	接触許容エネルギー比	
$n$	関節数	
$\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	<b>アーム手先位置</b>	<b>m</b>
$\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$	アーム関節角度	deg
$\boldsymbol{J} \in \mathbb{R}^{3 \times n}$	ヤコビ行列	m
$S$	アーム全体の持つ運動エネルギー	J
$\boldsymbol{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	アーム全体を剛体とみなした場合の慣性テンソル	kgm <sup>2</sup>
$m_i$	根元から <b>i</b> 番目のリンクの質量	kg
$\boldsymbol{I}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	根元から <b>i</b> 番目のリンクの慣性テンソル	kgm <sup>2</sup>
$\boldsymbol{a}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	根元から <b>i</b> 番目の関節軸の方向を示す単位ベクトル	
$\boldsymbol{r}_{ji} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	関節軸 <b>j</b> からリンク <b>i</b> の重心までのベクトル	m
$\boldsymbol{b}_j \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	$\boldsymbol{r}_i^j$ と $\boldsymbol{a}_j$ のベクトル積	m
$\boldsymbol{G} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	一般化慣性テンソル	kgm <sup>2</sup>
$\boldsymbol{n} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	力の作用方向の単位ベクトル	
$m_v$	力の作用点の作用方向への仮想質量	kg

$l_i$	根元から <b>i</b> 番目のリンク長	m
$l_{g_i}$	根元から <b>i</b> 番目のリンクの重心位置	m

### 第3章, 第7章

$c_i$	根元から i 番目リンク長さ (DH法パラメータ)	m
$\alpha_i$	根元から i 番目リンクねじれ角 (DH法パラメータ)	deg
$d_i$	根元から i 番目関節オフセット	
$\theta_i$	根元から i 番目関節角	
$R_j^i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	第 i 軸の方向から第 j 軸の方向への回転行列	
$a_i \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	第 i 軸の方向ベクトル	
$I_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	根元から i 番目リンクの慣性テンソル	kgm <sup>2</sup>
$T_i^{i-1} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$	第 i-1 軸座標から第 i 軸座標への座標変換行列	
$l_{g_i} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	各軸の座標系で表した重心座標	m
$l_{g_i}' \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$	$l_{g_i}$ の同次座標表現	m
$r_{ji} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	関節軸 j からリンク i の重心までの位置ベクトル	m
$r'_{ji} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$	$r_{ji}$ の同次座標表現	m
$x \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	ベース座標で表した手先位置	m
$x' \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$	ベース座標で表した手先位置の同次座標表現	m
$l_{tip} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$	第 4 軸の座標系で表した手先座標	m
$J \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$	ヤコビ行列	m
$J^+ \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	$J$ の疑似逆行列	m
$J_g \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	重力補償アームのヤコビ行列	m
$S$	アームの運動エネルギー	J
$G \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$	第 4 軸の座標系で表したアームの慣性テンソル	kgm <sup>2</sup>

### 第4章

#### ・ 4.2 節

$\theta_a$	プーリ a でワイヤを巻き取った回転角	rad
$\theta_b$	プーリ b でワイヤを巻き取った回転角	rad
$f_a$	ワイヤ a の張力	N
$f_b$	ワイヤ b の張力	N
$R$	アームのプーリ半径	mm
$r$	モータのワイヤ巻取半径	mm
$E$	ワイヤの縦弾性係数	N/mm <sup>2</sup>

$A$	ワイヤの断面積	$\text{mm}^2$
$\varepsilon_a$	ワイヤ a の歪	
$\varepsilon_b$	ワイヤ b の歪	
$u$	ワイヤ変位	$\text{mm}$
$L$	ワイヤ長さ	$\text{mm}$
$T_p$	プーリの摩擦モーメント	$\text{Nmm}$
$I_p$	プーリの慣性モーメント	$\text{kgmm}^2$
$D$	系の粘性係数	$\text{kgmm}^2\text{s}$
$\theta_m$	モータ回転角度	$\text{rad}$

### 4.3 節

$\theta_m \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$	モータ回転角度	$\text{rad}$
$\theta_j \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$	関節回転角	$\text{rad}$
${}^M T_J \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$	干渉行列	
$\hat{\theta}_j \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$	推定関節回転角	$\text{rad}$
$\hat{\theta}_m \in \mathbb{R}^{6 \times 1}$	推定モータ回転角	$\text{rad}$
$K_M \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$	トルクゲイン	$\text{Nm/rad}$

## 第5章

$m_1$	Link1 とアタッチメントの質量の和	$\text{kg}$
$m_2$	Link2 とカウンタウエイト 1 の質量の和	$\text{kg}$
$m_3$	Link3 とカウンタウエイト 2 の質量の和	$\text{kg}$
$l_2$	Joint2 から Joint4 までの距離	$\text{m}$
$l_1$	Joint4 から Link1 の重心までの距離	$\text{m}$
$l_{m2}$	Joint2 の軸方向から見た時の Joint2 から $m_2$ の重心までの距離	$\text{m}$
$l_{m2}'$	Joint1 の軸方向から見た時の Link2 から $m_2$ の重心までの距離	$\text{m}$
$l_{m3}$	Joint3 の軸方向から見た時の Joint3 から $m_3$ の重心までの距離	$\text{m}$
$l_{m3}'$	Joint1 の軸方向から見た時の Link3 から $m_3$ の重心までの距離	$\text{m}$
$l_2'$	Link5 の長さ	$\text{m}$

$T_2$	Joint2 のアクチュエータの発生トルク	Nm
$T_3$	Joint3 のアクチュエータの発生トルク	Nm
$T_1$	Joint1 のアクチュエータの発生トルク	Nm
$F_2$	カウンタウエイト 1 にかける鉛直下向きの補償力	N
$F_3$	カウンタウエイト 2 にかける鉛直下向きの補償力	N
$r_2$	ワイヤ 1 の張力が作用する点の位置ベクトル	m
$r_3$	ワイヤ 2 の張力が作用する点の位置ベクトル	m
$C_2$	ワイヤ 1 の張力ベクトル	N
$C_3$	ワイヤ 2 の張力ベクトル	N
$u_1$	Joint1 の軸方向の単位ベクトル	
$u_2$	Joint2 の軸方向の単位ベクトル	
$u_3$	Joint3 の軸方向の単位ベクトル	
$\tau_1$	Joint1 回りのワイヤによる補償トルク	Nm
$\tau_2$	Joint2 回りのワイヤによる補償トルク	Nm
$\tau_3$	Joint3 回りのワイヤによる補償トルク	Nm
$T_1$	Joint1 回りの関節トルク	Nm
$T_2$	Joint2 回りの関節トルク	Nm
$T_3$	Joint3 回りの関節トルク	Nm
$T_a$	関節トルク総和	Nm
$T_b$	重力補償がない場合のトルク総和	Nm

## 第 6 章

### 6.3 節

$R$ ,	皿の底面の半径	mm
$r$	皿の縁の径	mm
$\theta$	皿の縁の傾き	rad
$w$	平行 2 指グリッパで持つ部分の長さ	mm
$P_i$	接触点	
$x_i \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$	$P_i$ の位置座標	mm
$N_i$	$P_i$ の垂直抗力	N
$\mu_i$	$P_i$ の摩擦係数	
$u_{i\alpha}, u_{i\beta} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$	$P_i$ での垂直抗力と摩擦力の合力が入る錐の稜線方向単位ベクトル	
$f_i$	$P_i$ にかかるときの力の大きさ	N
$F_{ix}, F_{iy}$	$P_i$ に加わる力が座標原点に及ぼす並進力	N
$M_i$	$P_i$ に加わる力が座標原点に及ぼすモーメント	Nm

$s$	板の先端位置	mm
-----	--------	----

#### 6.4 節

$\theta_m \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$	各モータ回転角度	rad
--	----------	-----

$\theta_j \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$	各関節角度	rad
--	-------	-----

${}^m T_j \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$	干渉行列	
--	------	--

$\tau_m \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$	把持対象物の重量に起因するモータトルク	Nm
--------------------------------------	---------------------	----

$\tau_j \in \mathbb{R}^{5 \times 1}$	把持対象物の重量に起因する関節トルク	Nm
--------------------------------------	--------------------	----

$\eta$	ベルトプーリ 1 組あたりの効率	
--------	------------------	--

$\tau_{a\_all}$	katana アーム単独で食器を把持する場合の総トルク	Nm
-----------------	-----------------------------	----

$\tau_{b\_all}$	干渉駆動機構を追加した場合の総トルク	Nm
-----------------	--------------------	----

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 人と共存するロボットアームの安全性

産業界では大量生産を目的に工場生産ラインの自動化が進められ、ベルトコンベア 1 台につき 1 品種の作業を大勢で行う「ライン生産方式」が数多く導入されてきた。しかし近年、製品のライフサイクルの短期化などでユーザのニーズが多様化し、一人および少人数で多品種変量生産を行う「セル生産方式」も増えてきている。これに対応して、従来ライン生産方式で用いられてきた産業用ロボットのセル生産方式への活用が進められている。産業用ロボットを用いたセル生産方式は以下の2種類がある。

- ・完全自動化したロボットセル生産方式
- ・部分自動化した人とロボットの協働型の生産方式

このうち、協働型の生産方式においては人間とロボットの共同作業による効率化が求められている。セル生産の作業内容はピック&プレース作業が作業全体の50%を占めている[1-1]。これらのピック&プレース作業はものを掴んで所定の位置に置く単純な作業と、部品を掴み保持する、曲げる、持ち替えるなどの複雑な作業に大別される。このような作業の難易度に応じて人とロボットが作業を分担することで、ラインの早期立ち上げ、生産効率の向上を図ることができる。このような人間とロボットが協働する局面においては安全管理技術が重要となる[1-2]。

一方、医療、サービス産業、日常生活などの場面でも少子高齢化による人手不足を補うためのサービスロボットの導入が期待されており、人間と作業空間を共有できるロボットの開発が課題となっている。このように、人間と作業空間を共有できる、人間共存ロボットの考え方自体は古くからあり ([1-3]~[1-5])、様々な技術開発が行われてきた。最近になって各ロボットメーカーから協働ロボットとして製品が出て来始めているが、サービス業、日常生活の場面でのサービスロボットにおいて自律的に作業を行えるロボットはあまり出てきていない。これは、ロボットが人間と物理的、情動的インタラクションを行う上で必要となる安全性や機能を実現するための課題が多いためと考えられる。

例えば安全性において、従来の産業用ロボットの安全対策としては、作業空間の分離、フェールセーフ設計、緊急停止ボタンなどが挙げられる[1-6]。しかし、人間-ロボット共



存系では状況が異なり，ロボットと人間を空間的に分離できない．そのため人間とロボットが衝突することを前提とした安全性を考えることが重要となってくる．これに対応してロボットの安全規格も変わりつつある．

以上を考慮した，ロボットの安全性を確保する機能としては，Fig.1.1 に示すようなものが挙げられる(文献[1-5]及び ISO/TS 15066 から抜粋)．例えば，質量軽減化に関しては，DC,AC サーボモータのみならず，トルク質量比の高い空気圧等のアクチュエータを用いたアームの開発，ワイヤプリーそのほかの遠隔駆動方式の適用，さらに剛性の低い関節機構の開発等が挙げられる．また，力学的接触を検知するセンサについて，ロボットが衝撃や挟圧状態を検知し，回避する制御が必要となり，ロボット表面を死角なく圧力センサを分布させたり，関節トルクセンサを有効に利用する手段が考えられる．さらに，ロボットが誤動作して上記制御では対処できない状況に対処するため，ロボット表面に柔軟な被覆を装着することも考えられる．このように，安全性を確保していくためには機構的，制御的，認識的に対策を組み合わせることで総合的に対処していく必要がある．

このうち，機構的対策については設計段階で必要であり，また，万が一の電気系トラブルなどを考えると，機械の設計による保護方策である本質安全に近い対策である．さらに，ロボットにおいて機構に工夫をこらして制御とのバランスをとることで，従来にない有用な機能を持たせることが可能であることから，人と共存するロボットのたの新しい安全性対策の提案に貢献できる可能性がある．そこで，本研究は人と共存するロボットのための機構的対策を研究対象とする．

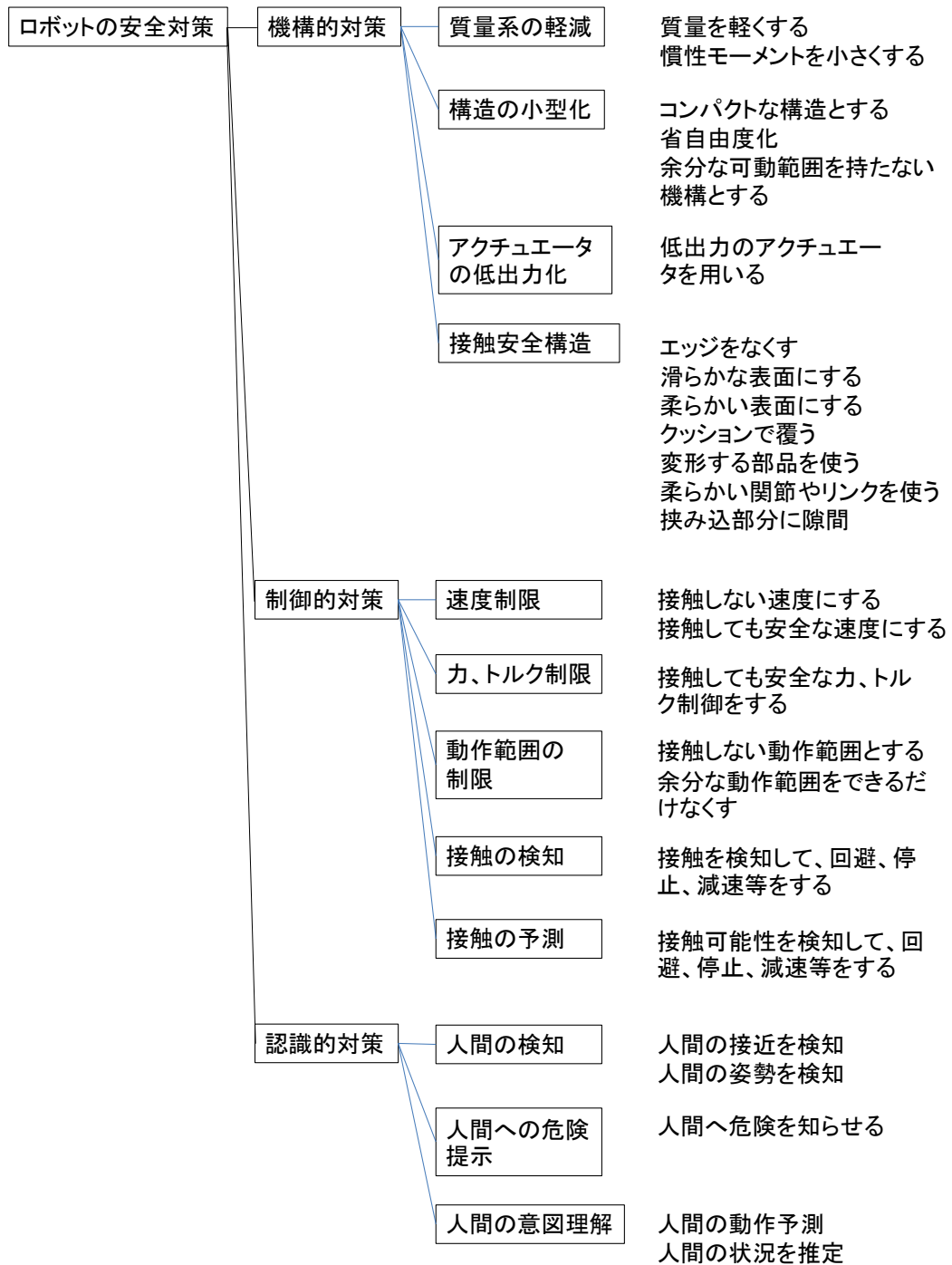


Fig.1.1 Function to ensure robot safety

### 1.1.2 アームの人への接触に対する安全機構

人と作業空間を共にするロボットの例としては、近年各ロボットメーカーから協働ロボットとして製品化されてきている[1-7]～[1-12]。この普及を後押ししているのが、安全性技術の進化とそのプロセスの明確化である。規制緩和とも関連するが、ISO 10218-2等で人間協調型ロボットのリスク評価手法が整備されてきたことに加え、ロボットメーカー各社がその要求に応えるような技術をそろえてきている。具体的には、人間の接近をセンサで検知する、接触をセンサで検知する、コンプライアンス制御、滑らかな表面形状、表面を弾性体で覆うなどの安全対策が施されている。ただし、今のところ産業用であり、出力も大きめでサービス産業や生活空間で用いるのは難しい。生活空間で用いることのできるアームとするためにはまだ課題は多く残されていると考えられる。

ここで、Fig.1.1に挙げた機構的対策の研究例を見ていくと、質量軽減化に関しては、リンク、電気粘性流体、ワイヤプリーそのほかの遠隔駆動方式の適用（例えば[1-13][1-14]等）、重量部材の基部への集中させる構造、リンク部材へのFRPの適用、空圧アクチュエータの適用（例えば[1-15]等）等がある。アクチュエータの低出力化については、質量の軽減化とも関係するが、自重補償機構、複数関節を複数モータで協調して効率よく駆動する干涉駆動機構（例えば[1-16]等）、能動変速機構により低出力アクチュエータでも広いトルク範囲をカバーする方法（例えば[1-17]等）等がある。コンパクト化、省自由度化については作業性を考慮した初期設計時のリンク長、関節数の最適化手法[1-18]等が提案されている。接触安全構造としては、表面を柔らかい被覆で覆う構造、関節に能動的な粘弾性要素を構成するアーム（例えば[1-19]等、柔らかいリンクを使ったアーム等が提案されている。

安全なアームを実現していくためには、このような機構を統合的に組み合わせて安全性を高めていく必要がある。このうち本研究では、アーム基本設計に関わる部分が比較的大きい、

- ・質量系の軽減
- ・アクチュエータの低出力化
- ・構造の小型化

を対象とし新機構の提案を行っていく。このようなアーム機構はこれまでにいろいろと提案されているが、本研究ではサービスロボットへの適用を考慮し、Fig.1.2に示すような我々の開発した移動ロボットに搭載できる、全体構造、システムがコンパクトなアームとし、さらに、生活空間内で最も重要な支援機能である「机の上等のものを持ち上げる、置く」([1-20]) ことのできるアームをコンセプトとして機構提案を行っていく。

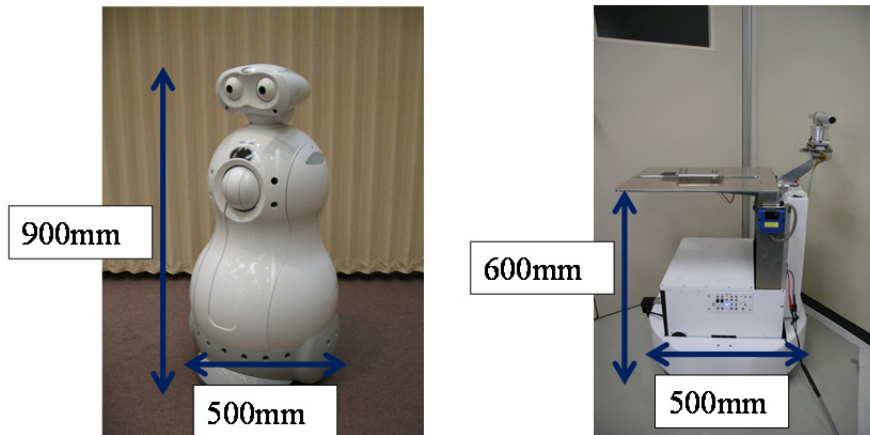


Fig.1.2 Example of Mobile Robot

### 1.1.3 アームの安全性評価指標

前節で述べたような安全機構をアームに取り込んでいくためには、安全性の定量化が必要である。各種の安全機構の効果を同じ座標軸上で定量的に比較、検討し、ロボットの設計制御の最適化が可能となる。さらには、ロボットの機構や制御系の設計者はロボットの特性を的確に把握することが重要であり、そのためには、複雑な特性を理解しやすい方法で表すことが必要であると考えられる。

従来、アームの特性に関する多くの指標が提案されている。例えば、アームの静力学的特性を表す指標として、ヤコビ行列から関節速度と手先速度の関係を表した可操作性楕円体[1-21]、静的なトルクと力の関係を表す操作力楕円体[1-22]等がある。さらに、同様にアームの動力学的特性を表す指標として、トルクと手先加速度の関係を表す動的可操作性楕円体[1-23]、手先の負荷変化にも対応したインピーダンスマッチング楕円体[1-24]等が提案され、さらに、アームの分布質量を手先位置での仮想的な質量に置き換えることができる、一般化慣性楕円体も定式化[1-25]されている。

安全性の評価指標については、アクチュエータ配置の危険度[1-26]や操作の安全性の研究[1-27]、また、ロボットの安全性の指標とするために、表面形状や柔らかさを定量化する提案もある[1-28]。さらに、人間と不意に衝突することを前提とした衝突安全の研究として、痛覚耐性を安全基準とする[1-29]の方法が代表的である。これを基準として、表面に粘弾性被覆と緊急停止を組み合わせて安全性を実現したアームが開発されている[1-30]、[1-31]。

一方、ロボットの安全性に関する国際規格において、『ISO 12100』は産業用制御全体のリスク評価をするもので、リスクを定義して特定し、対策をどうするかというプロセスを規定したものである。さらに『ISO 10218-2』は約15年前に規定されたもので、産業用ロボットそのもののリスク評価をするものである。現在の生産現場で人と作業空間を共にする協働ロボットはこの規格およびその改訂版を基準としているものが多い。これらに対し

て、『ISO/TS 15066 Robots and robotic devices — Collaborative robots』は2016年初頭に規定されたもので、協働型ロボットの安全性を規定したものである。人に対するリスクを削減する、協働的な空間の設計および実装に関する指針を提供しており、さらに、設計とリスク評価要件だけでなく、痛覚閾値対ロボットの速度、圧力および特定部位に対する影響に関する調査研究についても述べている。これを参考として、[1-28]の痛覚耐性基準を拡張して様々なアームに適用できる統一的な評価指標を提案することは有効であると考えられる。

## 1.2 本研究の目的

以上述べてきた背景を元に、本研究では、生活空間で用いることのできるアームを実用化するための機構要素の提案および、それらを搭載したアームの安全性を統一的に評価できる手法の提案を目的とする。機構要素の提案においては、機構に限らず様々な対策を統合的に行っていく必要はあるが、本研究ではアーム基本設計に関わる部分が比較的大きい、質量系の軽減およびアクチュエータの低出力化、構造の小型化を目的とした機構を提案する。さらに、サービスロボットへの適用を考えて、移動ロボットにも搭載できるコンパクトなアームで、机の上等にある物を持ち上げる、置くことのできるアームをコンセプトとした機構とする。アームの安全性評価手法の提案においては、安全機構をアームに取り込んでいくために、ロボットの特性を的確に把握することを目的とし、ISO/TS 15066で提案されている痛覚耐性に基づく安全速度の手法を拡張して実際に様々な機構、自由度のアームに対応できる手法とする。最後に提案した機構の質量系の軽減およびアクチュエータの低出力化、構造の小型化の効果について評価を行い、さらに提案した安全性評価手法で評価して、アームの安全特性を評価する。

## 1.3 本研究の対象と方法

本研究の対象と方法として、まず、アームの安全性評価手法の提案においては、国際規格 ISO/TS 15066 で提案されている、アームの人への接触時の接触伝達エネルギーを基準とした評価方法を応用し、これを算出するためのアームの質量特性を求める手法を提案する。具体的には、多自由度のアームの質量特性をどう見積もるかが問題となるため、一般化慣性楕円体を用いた多自由度アームの質量特性算出方法を提案し、これをもとに接触伝達エネルギーの評価を行っていく。なお、接触伝達エネルギーは接触形状や接触部の柔らかさ等の影響も受けるが、本研究では主にリック機構構成の評価を主な目的とするため、これらは考慮しない。

次に、アームのサービスロボットへ応用するためのアーム機構の提案および提案した評価手法によるアーム機構の評価を行っていく。最初にモータを各関節に配置した従来よくあるタイプの、モータ関節配置型アームを評価する。この結果をもとに、このアームの機能や安全性についての問題点を定量的に把握し、新しいアーム機構の提案につなげる。

アーム機構の提案においては、ワイヤ駆動アーム、重力補償アーム、軽量ハンド（下面支持ハンド）搭載アームの3種類のアーム機構を提案する。安全を考慮したアーム機構設計の要求仕様に対するそれぞれのアームの特徴をまとめた表を Table 1.1 に示す。Fig.1.1 に示した安全に対する機能の機構的対策から、本研究のターゲットである、質量軽減、アクチュエータ低出力化、構造の小型化をピックアップして要求仕様とした。それぞれの機構の概要を述べると、ワイヤ駆動アームは、アクチュエータを基部に配置し、ワイヤ経路の工夫、テンショナー機構等の独自機構による、質量の低減と構造の小型化が大きな特徴であり、さらに、オフセット関節によるリンク長減による構造の小型化を独自の機構で実現する。重力補償アームは、独自の3次元重力補償機によるアクチュエータ出力低減化、構造の小型化が特徴であり、さらに、アクチュエータをカウンタウエイトとして利用する構造や、手先負荷に応じた追完の重力補償機構により、さらなるアクチュエータの低出力化を実現している。下面支持ハンド搭載アームについては、器用なハンドリングを多自由度の重いハンドを用いずに、機構を工夫した軽量のハンドを使用する質量軽減化や、干渉駆動によるアクチュエータの低出力化を独自の機構で実現している。

Table1.1 Feature of Each Mechanism

	質量軽減	アクチュエータ出力(トルク)減	構造の小型化(可動部)
ワイヤ駆動アーム	ワイヤ経路の工夫、ワイヤ自由度配置、絞り機構 張力自動調整機構		ワイヤ経路の工夫、ワイヤ自由度配置、絞り機構 張力自動調整機構 オフセット関節
重力補償アーム	アクチュエータをカウンタウエイトとして利用できる構成	シンプルな構成の3次元重力補償機構 アクチュエータをカウンタウエイトとして利用できる構成 手先の負荷に応じた追加の重力補償	シンプルな構成の3次元重力補償機構 2段階の重力補償機構によるコンパクト化
下面支持ハンド搭載アーム	下面支持ハンド アームの途中からリンクを分岐する構造	下面支持ハンド 干渉駆動機構	アームの途中からリンクを分岐する構造

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成を Fig.1.3 に示す。本論文は8章で構成され、次章ではロボットアーム機構の安全に関する評価手法を検討し、安全に関する質量特性の評価手法を提案する。国際規格 ISO/TS 15066 を応用し、アームの人への接触時の接触伝達エネルギーを算出するため、アームの接触点における仮想質量の算出において、一般化慣性楕円体と換算質量を用いることを提案する。さらに、平面2リンクアームを使用したケーススタディにより、質量特性の改善による性能向上や、出力可能な手先速度、関節速度等の評価方法を示す。

第3章では、人間共存ロボットのアームとして用いるための機能および安全に関する質量特性を評価していくため、従来よくあるタイプのモータ関節配置型アームの開発と評価について述べる。このアームはモータを各関節に配置した標準的なタイプのアームである。このアームの概要について述べ、機能および2章で述べた質量特性の評価を行い問題点を定量的に把握する。これを次章以降のアーム機構設計の基準としていく。

第4章では、アームの関節駆動方式に着目し、モータをアームの根元に配置し、ワイヤで関節に動力を伝達することによって可動部の質量を軽減するワイヤ駆動アームの開発について述べる。構造の小型化のためのワイヤ経路の工夫、独自のテンショナー機構、オフセット関節によるリンク長減を示し、さらに、アーム姿勢や手先負荷によるワイヤの伸びやたるみに対応した制御手法についても述べる。

第5章ではアクチュエータを低出力にできる重力補償機構に着目し、多自由度のアーム姿勢を取ることができつつ、かつアクチュエータの低出力化を実現したサービスロボット搭載用アームに適した、3次元のアーム姿勢にわたって重力補償を行える重力補償アームについて述べる。アクチュエータ小型化による質量軽減、重力補償によるアクチュエータ出力低減化を示し、さらに、手先負荷に応じた追加の重力補償、構造の小型化のための2段階の重力補償についても述べる。

第6章ではハンド機構に着目し、食器ハンドリングをターゲットとし、様々な物体を扱うため、大型で重いハンドを用いるのではなく、アームを含めた系全体のシステムを考えて機構を追加することにより、器用なハンドリングを実現するための、下面支持機構搭載アームの開発について述べ、把持トルクの軽減化や干渉駆動機構によるトルクの軽減化等について示す。

第7章では、4章から6章までで開発したアーム機構の評価を行う。まず、各アームの機構的特徴が、質量の軽減、アクチュエータ低出力化、構造の小型化にどこくらい寄与しているかをまとめる。さらに、2章で提案した安全に関する質量特性評価手法により定量的な評価を行う。この際、3章で開発した標準的なアームと比較して、質量特性の改善による出力可能な手先速度、関節速度等の評価を行う。最後に8章でまとめを述べる。

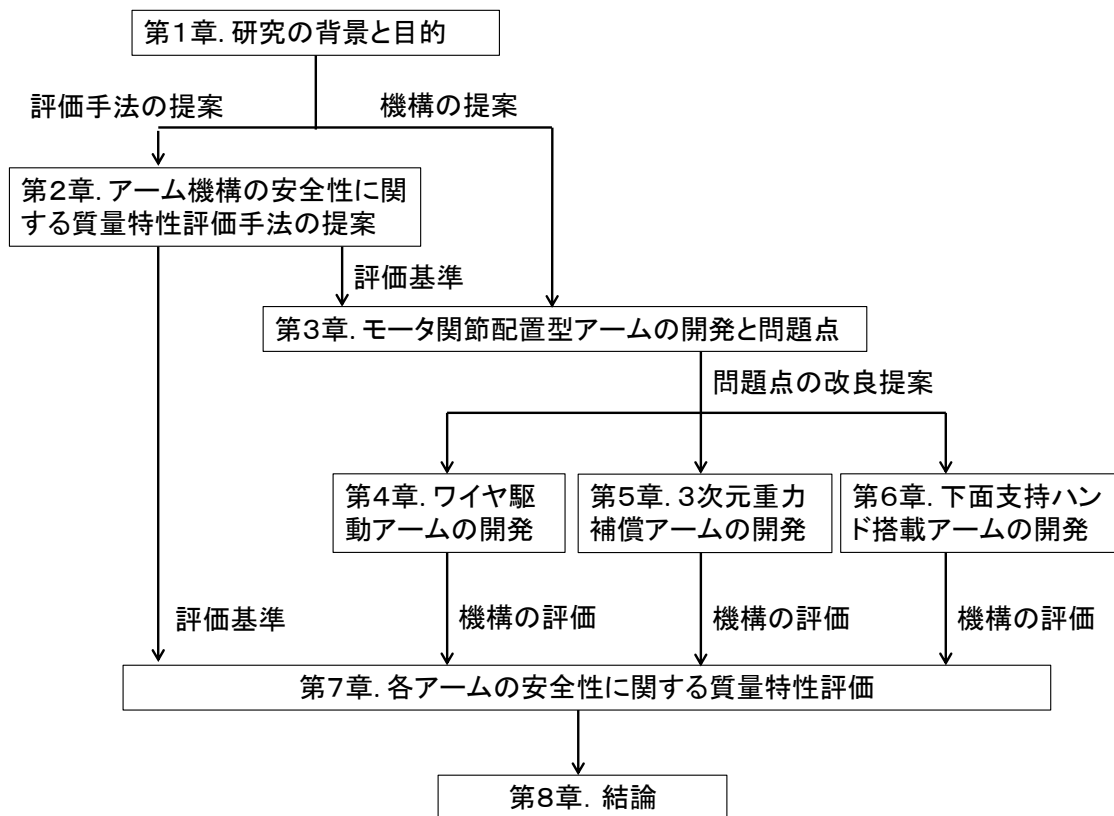


Fig.1.3 Flow of this Research



## 第2章 ロボットアーム機構の安全に関する 質量特性評価手法の提案

本章ではロボットアーム機構の安全に関する評価手法を検討し、従来研究および国際規格の動向から、多関節ロボットアームに対応した痛覚耐性に基づく質量特性の評価手法を提案する。

### 2.1 ロボットアームの評価指標の動向と接触安全性の定量化

ロボットの安全に関する国際規格において、「ISO 12100」は産業用制御全体のリスク評価をするもので、リスクを定義して特定し、対策をどうするかというプロセスを規定したものである。さらに「ISO 10218-2」は2002年に規定されたもので、産業用ロボットそのもののリスク評価をするものである。現在の協働ロボットはこの規格およびその改訂版を基準としているものが多い。これらに対して、「ISO/TS 15066 Robots and robotic devices — Collaborative robots」は2016年初頭に規定されたもので、協働型ロボットの安全性を規定したものである。人に対するリスクを削減する、協働的な空間の設計および実装に関する指針を提供しており、さらに、設計とリスク評価要件だけでなく、痛覚閾値対ロボットの速度、圧力および特定部位に対する影響に関する調査研究についても述べている。以下に内容の一部をまとめる。

人とロボットの協働的な空間の設計においては、まずは空間の分離が原則になるが、空間を共有する場合も多く出てくる。そのため、人とロボットの接触を考慮した安全対策が必要になる。接触に対する協働ロボットの安全対策として、大きく、Passively design と Actively design があり、それぞれ以下のような対策内容が考えられる。

#### ○Passively design

- ・接触面積を大きくする
  - エッジをなくす、滑らかな表面にする、柔らかい表面にする
- ・エネルギーを吸収する、エネルギーの作用時間を長くする、衝撃力を減らす
  - クッションで覆う、変形する部品を使う、柔らかい関節やリンクを使う
- ・可動質量を制限する

○Actively design

- ・力，トルク制限
- ・モーメント，パワー，質量と速度の関数で表されるエネルギーを制限する
- ・接触の予測もしくは検知をする

安全なアームを実現するためにはこれらの対策を統合的に施していかなければならない。

さらに，ロボットが人と接触した場合の，人の痛覚閾値対ロボットの速度，力および特定部位に対する影響については，人体の各部位ごとの痛覚耐性に基づく接触許容力  $F_{\max}$  が研究されており，接触時の衝突モデルを考慮した有効弾性係数  $k$  および有効質量  $m_H$  の研究結果が記されている．なお，接触許容力は AIS (Abbreviated Injury Scale) を基にしており，元々は自動車事故に関するデータベースとして利用するために考案された指標である．なお，ISO/TS 15066 には，接触許容力を用いる方法と，接触許容圧力と断面積を用いる方法が記載されており，接触面積が大きい場合等は接触許容圧力と断面積を用いる方法が適している．本研究では，比較的小さいアームで，接触面積も大きくないので，接触許容力を用いる方法を採用する．これらの人体の各部位ごとの値を Table 2.1 に示す．

Table 2.1 Characteristics of the body parts (ISO/TS 15066)

	Maximum Possible Force	Effective Spring Constant	Effective Mass	Maximum Transferred Energy
Units	[N]	[N/m]	[kg]	[J]
Symbols	$F_{\max}$	$k$	$m_H$	$E_{\max}$
Head	130	150000	4.4	0.23
Face	65	75000	4.4	0.11
Shoulder	210	35000	4.0	2.5
Upper Arm	150	30000	3.0	1.5
Lower Arm	160	40000	2.0	1.3
Palm	140	75000	0.6	0.49
Finger	140	75000	0.6	0.49

ここで，接触許容力を基にした接触許容エネルギーを  $E_{\max}$  とすると，

$$E_{\max} = \frac{F_{\max}^2}{2k} \quad (2-1)$$

となる．よって， $E_{\max}$  は人体の部位毎に異なる．

今，アームの接触点での速度と，人体の接触部位との相対速度を  $v$ ，アームの接触点換算

の質量を  $m_R$  とするとロボットが接触時に与える接触伝達エネルギー  $E_R$  は、二物体の衝突による相対運動エネルギー変化より、式(2-2)で表される。

$$E_R = \frac{1}{2} \mu v^2 \quad (2-2)$$

ここで、 $\mu$  は換算質量で、二物体の衝突による相対運動エネルギーを求める際に用いる有効な慣性質量であり、式(2-3)で表される。

$$\mu = \left( \frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R} \right)^{-1} \quad (2-3)$$

よって、式(2-4)のように、

人体への接触時でも危害を加えないエネルギー  $E_{\max} >$

アームの接触点で出しうる速度と質量から求めた最大の接触伝達エネルギー  $E_{R\max}$  を満たせばよいことになる。

$$E_{\max} > E_{R\max} \quad (2-4)$$

## 2.2 アーム機構の安全性に関する質量特性評価手法

前節で述べたロボットアームの安全対策において、機構設計に関わる項目は主に *Passively design* である。この中で、機構選択の本質に関わる項目は質量を減らすことである。よって、本研究では、表面をなめらかにしたり、柔らかくしたり、低剛性の部品を使うなどの対策は追加検討項目とし、質量特性で評価する手法を提案する。つまり、アーム機構の本質安全として、万が一人と接触しても危害を加えないアームの質量特性を評価する手法とする。ここで、質量特性とは質量系（質量、慣性モーメント）の低減のことを主に指している。機構的安全対策の質量系の軽減、アクチュエータの低出力化、構造の小型化の3つの項目についてはそれぞれ密接に関わっており、（構造を小型化すれば質量は軽くなり、質量が軽くなればアクチュエータが低出力で済む、アクチュエータが低出力になれば質量は軽くなり、構造も小型化できる）この中で比較的評価のしやすい質量の低減を評価することで、ある程度3つの項目を含んだ評価ができる可能性がある。

前提条件としては、前節の式(2-4)があり、アームの接触点における接触方向のエネルギーを求めなければならない。そこで、一般化慣性楕円体より定義される、アーム手先での仮想質量の考え方[2-1]を導入する。つまり、アームの接触点における接触方向の速度と接触方向の仮想質量から式(2-3)で表される人体との接触時の換算質量を算出し、式(2-5)で表される接触許容エネルギーとの比率  $r_E$  を算出して評価することを提案する。これは体の部分への接触許容エネルギーと接触時の接触伝達エネルギーの比を示しておりこれが 1 以下

であれば許容範囲であるとする，このようなアーム手先でのエネルギー楕円体の考え方は，[2-2]などで提案されているが，もともとはロボットの突き当て作業のために用いられており，固定環境への接触，衝突を想定したもので，人体との接触を考慮して，式(2-3)で表される換算質量を用いることは提案されていない。

今，人体への接触時でも危害を加えないエネルギーとアームの接触点で出しうる速度と質量から求めた最大の接触伝達エネルギーの比を $r_E$ とし，式(2-5)が成り立つことをアーム先端での全接触方向において評価，さらにこれをアーム可動範囲にわたって評価を行い，アームの持つエネルギーが接触許容エネルギー以下であることを確認する．さらにアームの「肘」等の主な特徴部分についても同様の計算を行い，接触危険性についても評価する．

$$r_E = E_{Rmax}/E_{max} < 1 \quad (2-5)$$

接触点におけるエネルギーを算出するためには，接触点での接触方向の速度，質量を求めなければならない．そこで，一般化慣性楕円体を導入する．例として Fig.2.1 に示すようなアームを元に一般化慣性楕円体を算出する．

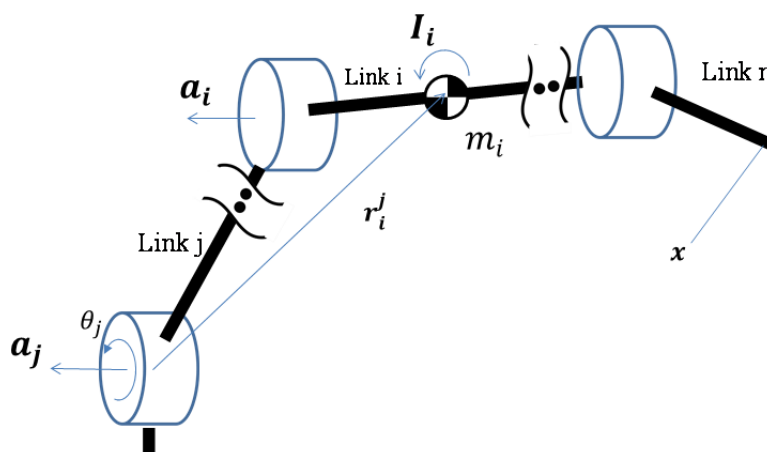


Fig.2.1 Parameter of the arm

ここではまず，接触点をアーム手先として考える．接触点における接触方向の速度（手先速度）については，手先位置を $\mathbf{x}$ ，関節角度を $\boldsymbol{\theta}$ とすると，ヤコビ行列 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ を用いて式(2-6)で表される．

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2-6)$$

次に接触点における接触方向の質量については，一般化慣性楕円体の考え方をを用いた，仮想質量を用いる．なお，ここでは $n+1$ 個のリンクと $n$ 個の関節からなるアームを考える．アーム全体の持つ運動エネルギー $S$ は，アーム全体を剛体とみなした場合の慣性テンソル

$H$ を用いて,

$$S = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T H \dot{\theta} \quad (2-7)$$

ただし,

$$\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dots, \dot{\theta}_n]^T \quad (2-8)$$

ここで, 単一のリンクの慣性テンソルを  $I_i$ ,  $j$  番目の関節軸の方向を示す単位ベクトルを  $a_j$ , 関節軸  $j$  からリンク  $i$  の重心までの位置ベクトル  $r_{ji}$  と  $a_j$  のベクトル積を  $b_j$  とすると,  $H$  は式(2-9)で表される.

$$H = \sum_{i=1}^n (A_i^T I_i A_i + m_i B_i^T B_i) \quad (H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, I_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}) \quad (2-9)$$

$$A_i = [a_1, \dots, a_n, 0, \dots, 0], \quad B_i = [b_1, \dots, b_n, 0, \dots, 0]$$

これを手先座標に変換する場合, 運動エネルギーと慣性テンソルは式(2-10)のように変換される.

$$S = \frac{1}{2} \dot{x}^T G \dot{x}, \quad G = (J^{-1})^T H (J^{-1}) \quad (G \in \mathbb{R}^{3 \times 3}) \quad (2-10)$$

ただし,  $J$  が正方行列でない場合は, 例えば疑似逆行列を使うことが考えられる.

$G$  を剛体系の一般化慣性テンソルでこれに対して手先座標系での位置ベクトル  $u$  を用いて式(2-11)の式で表される楕円体を一般化慣性楕円体と呼ぶ.

$$u^T G u = 1 \quad (2-11)$$

この楕円体の主軸の方向は式(2-10)の固有ベクトルで与えられ, 主軸の長さ是对応する固有値の平方根に反比例する.

次に, 力の作用点から見た系の等価慣性の考え方を導入する. 力の作用方向の単位ベクトル  $n$  とすると, 力の作用点の作用方向への仮想質量  $m_v$  は式(2-12)で表される.

$$m_v = n^T G n \quad (2-12)$$

この仮想質量  $m_v$  をアームの接触点における接触方向の質量として用いる. 仮想質量の最大, 最小値およびその方向は式(2-10)の最大, 最小固有値およびそれに対応する固有ベクトルとなる.

仮想質量についての定性的な説明の図を Fig.2.2 に示す. 同じアームで Fig.2.2(a)と Fig.2.2(b)の2つの異なる姿勢での接触を考える. このとき, Fig.2.2(a)のほうが手先での仮想質量は大きくなるため, 接触点での接触時の速度が双方で同一とすると, Fig.2.2(a)のほうが接触伝達エネルギーが大きいということがわかる. このように仮想質量が分かると, 仮想質量と手先速度を用いて, そのアーム姿勢および接触方向での接触伝達エネルギーがわかり, 体の部分への接触許容エネルギー以下であれば (エネルギー比  $re < 1$ ), 安全とみなす.

今, Fig.2.3 に示すような平面2リンクアームを考える. このリンクで2種類の質量特性を設定し, 式(2-11)で求めたアーム手先に関する一般化慣性楕円体を Fig.2.4 に示す. なお, (a)と(b)の各質量特性は各図中に示している. このようにアームの姿勢および質量特性によって一般化慣性楕円体の形状が変わることがわかる. この楕円において短軸の方向が仮想質量が最大となる方向であり, 楕円の長軸の方向が仮想質量の最小となる方向を示している.

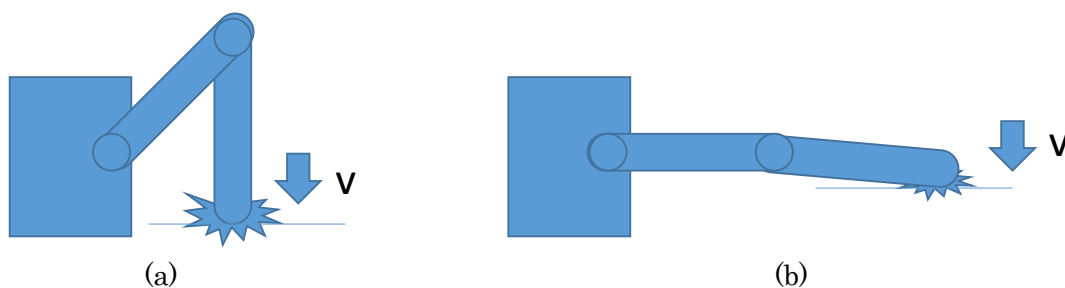


Fig.2.2 Contact Situation

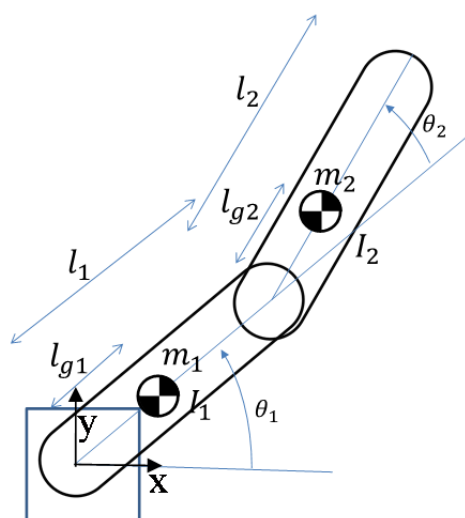


Fig.2.3 2 Link arm in the plane

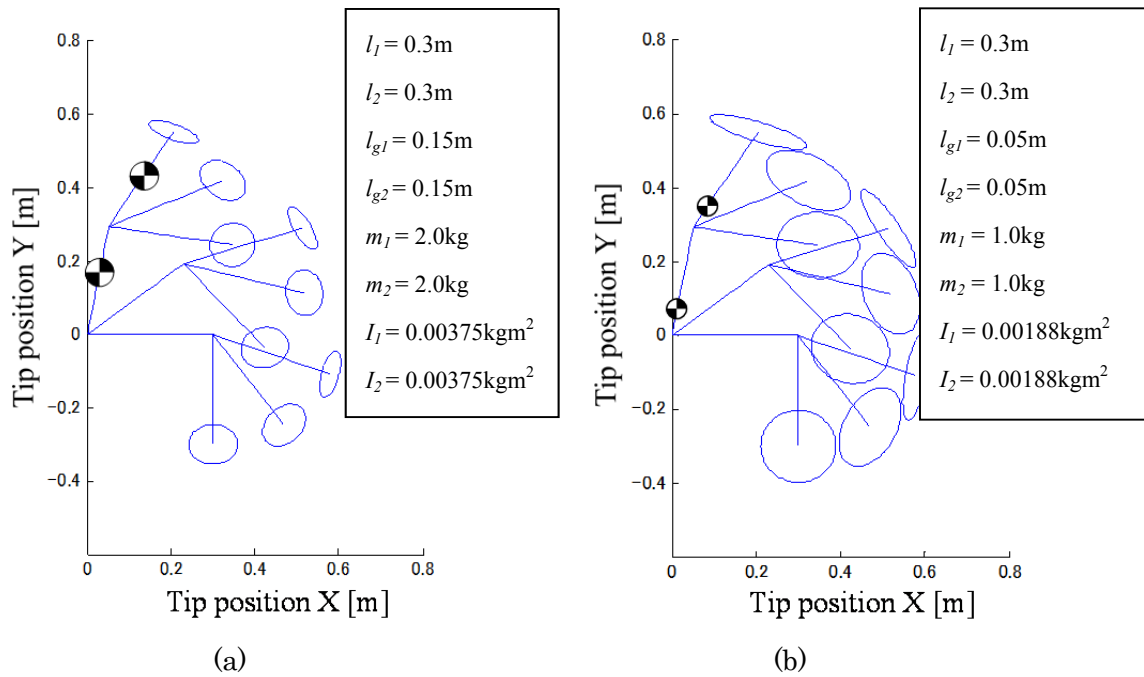
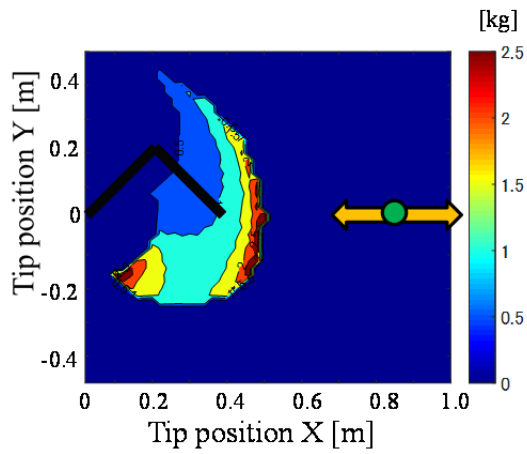


Fig.2.4 Generalised Inertia Ellipsoid

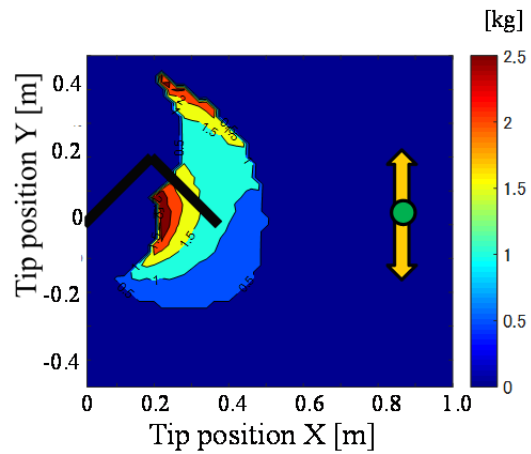
次に、式(2-12)より算出した、力がかかる方向による仮想質量の分布を Fig.2.5 に示す。これらは Fig.2.4(a)の質量特性を用い、Fig.2.5(a)は X 方向に力がかった場合の仮想質量、Fig. 2.5(b)は Y 方向に力がかった場合の仮想質量、Fig. 2.5(c)は X 方向と 45 deg をなす角度の方向に力がかった場合の仮想質量、Fig. 2.5(d)は X 方向と -45 deg をなす角度の方向に力がかった場合の仮想質量を示している。このように力のかかる方向による仮想質量の分布を調べることができる。

また、これらの全方向の仮想質量からその手先位置での最大値を求めプロットしたものを Fig.2.6 に示す。この分布より、手先位置による接触時の危険度がわかり、仮想質量が大きいほど危険であることを示している。なお、仮想質量が下がると同じモータ出力では暴走時の加速度は上がってしまうことも考えられるが、仮想質量が下がった分、出力を下げたモータを用いることができるので、暴走時の加速度は下げられる。

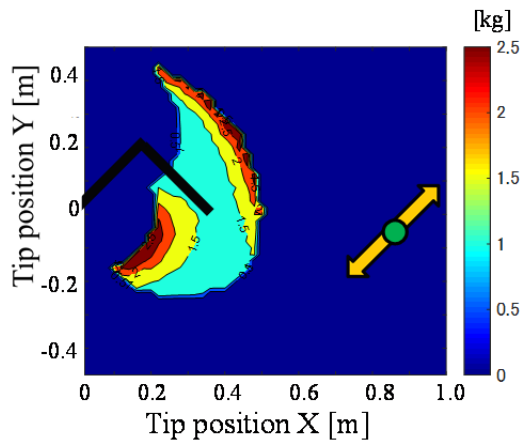
ここでアーム姿勢の特異点の場合について説明する。Fig.2.7 のようにアームが伸びきった状態付近で図中の矢印の方向を考えると、この位置での一般化慣性楕円体の短軸が矢印の方向になり、短軸長さも 0 に近づくため、アームが伸びきった状態での矢印の方向の仮想質量は無限大になる。Fig2.4 から Fig2.6 では一般化慣性楕円体や仮想質量の分布をわかりやすく表示するために、特異点付近は避けた可動範囲としている。ただし、式(2-3)の換算質量 $\mu$ の算出においては、 $m_R = \infty$ より、 $\mu = m_H$  と計算でき、また、式(2-2)の接触伝達エネルギー $E_R$ の算出においては、特異点のためこの方向への速度は出せない ( $v = 0$ ) ので、 $E_R = 0$ となる。



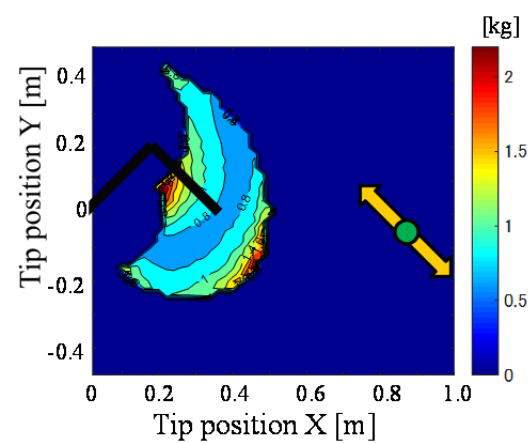
(a) X Direction



(b) Y Direction



(c) XY Direction



(d) X-Y Direction

Fig.2.5 Virtual Mass

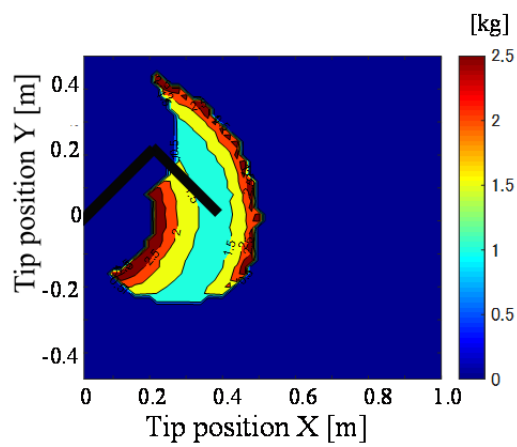


Fig.2.6 Distribution of Max Virtual Mass



また、特異点付近では生成速度も方向によって制限され、図の矢印の方向に出せる速度は0であり、仮想質量と速度から算出するエネルギーは0となる。このように、仮想質量の分布は手先速度を一定とした場合のアームの特性を把握するには有効であるが、特異点付近の速度も考慮した特性も把握するには、次に示すエネルギー分布をみる必要がある。

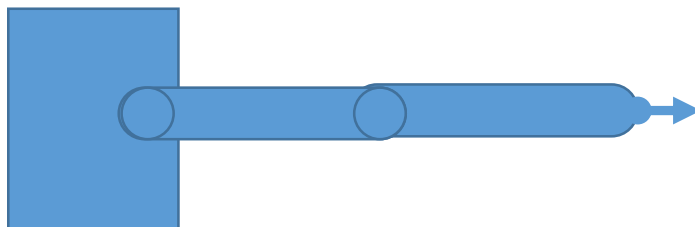
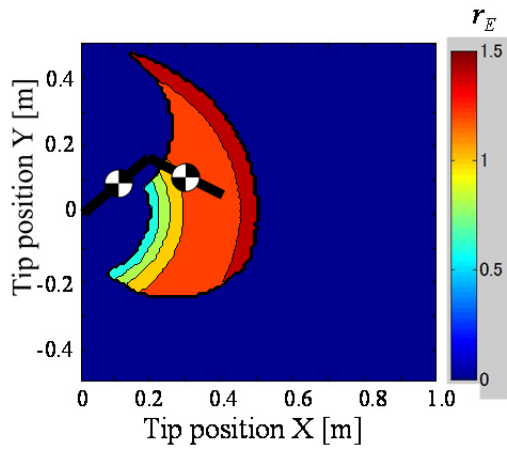


Fig.2.7 Singular Point of the Arm

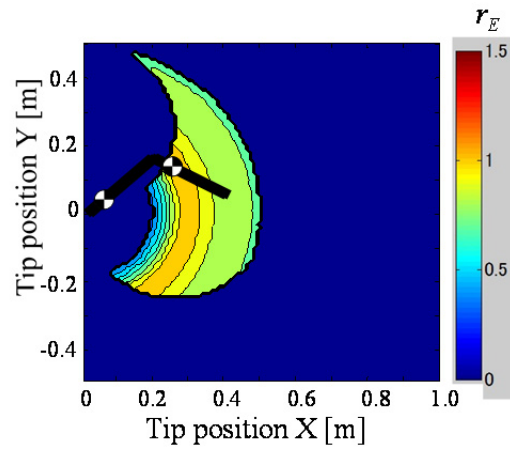
以上より求めたアーム接触点の接触方向の速度と仮想質量から、式(2-2)、(2-3)で表されるように換算質量を算出し接触伝達エネルギーを求める。なお、速度については、出会う関節速度の組合せから手先速度を総当たりの算出して用いる。算出した接触伝達エネルギーの中から手先位置 $\mathbf{x}$ における最大値を求めて、この最大値から式(2-5)で表される接触許容エネルギーとの比率 $r_E$ を求めた結果を Fig.2.8, Fig.2.9 に示す。

なお、Fig.2.8 は上腕接触を基準としたアームの安全性評価の例、Fig.2.9 は顔接触を基準としたアームの安全性評価の例である。なお、上腕は Table.2.1 で示す人体の部位の中で中間的な痛覚耐性を持ち、顔は最も痛覚耐性が低い。以降の評価ではこの2部位について行っていく。左右それぞれの図でアームの質量特性を変えて評価を行っており、(a)は2つのリンク長さを人間の腕と同程度の0.25mとし、質量は2つのリンクで同じ0.6kg、重心はリンクの中心にあるとした場合の質量特性である。これに対して(b)はリンク長さは同じとし、リンク質量は軽量化したとして0.35kg、重心位置もアーム根元方向にずらした場合の質量特性とした。Fig.2.8(a)、Fig.2.9(a)のように、 $r_E$ が1を超えていた場合でも、質量を軽くし、重心位置をアーム根元方向に持ってくることで、Fig.2.8(b)、Fig.2.9(b)のように $r_E$ を1以下にできることがわかる。また、Fig.2.8とFig.2.9を比較すると、体の部位によって、接触許容エネルギーが異なっているため、最も痛覚耐性の低い顔の場合は、アームの質量特性の改善のみならず、接触速度も下げなければ、 $r_E$ を1以下にできないことがわかる。このように、作業効率を上げるためにできるだけ速度は落とさないことを考え、できるだけアーム設計時に質量特性を良くする方向で対応するが、対応しきれない場合は接触面積を増やすような表面形状の工夫や有効弾性係数を下げるため接触面を柔らかくする等の対策が必要となる。それでも対応しきれない場合は、速度も下げる必要がある。



$l1=0.25m, l2=0.25m, lg1=0.125m, lg2=0.125m,$   
 $m1=0.6kg, m2=0.6kg, I1=0.00078kgm^2,$   
 $I2=0.00078kgm^2, 0 < \theta_1 < 90deg, -135deg < \theta_2 < -30deg$   
 $-180deg/s < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2 < 180deg/s$

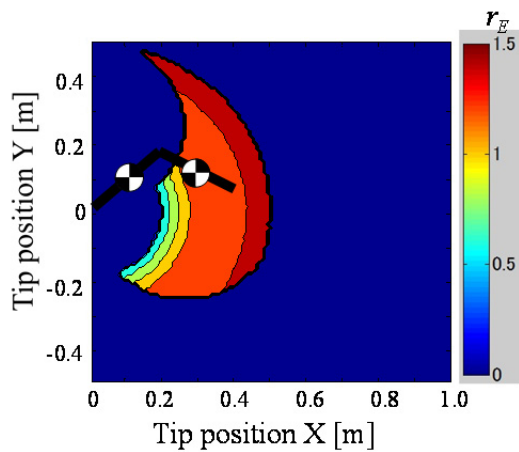
(a) Original Mass Characteristics



$l1=0.25m, l2=0.25m, lg1=0.05m, lg2=0.05m,$   
 $m1=0.35kg, m2=0.35kg, I1=0.00046kgm^2,$   
 $I2=0.00046kgm^2, 0 < \theta_1 < 90deg, -135deg < \theta_2 < -30deg$   
 $-180deg/s < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2 < 180deg/s$

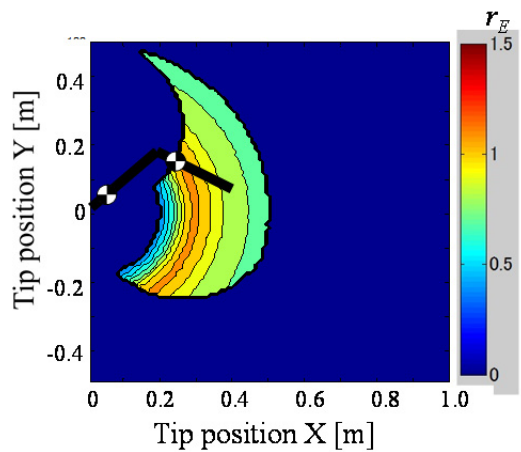
(b) Improved Mass Characteristics

Fig.2.8 An example of the safety value of the robot arm when it contacts the upper arm



$l1=0.25m, l2=0.25m, lg1=0.125m, lg2=0.125m,$   
 $m1=0.6kg, m2=0.6kg, I1=0.00078kgm^2,$   
 $I2=0.00078kgm^2, 0 < \theta_1 < 90deg, -135deg < \theta_2 < -30deg$   
 $-50deg/s < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2 < 50deg/s$

(a) Original Mass Characteristics



$l1=0.25m, l2=0.25m, lg1=0.05m, lg2=0.05m,$   
 $m1=0.35kg, m2=0.35kg, I1=0.00046kgm^2,$   
 $I2=0.00046kgm^2, 0 < \theta_1 < 90deg, -135deg < \theta_2 < -30deg$   
 $-50deg/s < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2 < 50deg/s$

(b) Improved Mass Characteristics

Fig.2.9 An example of the safety value of the robot arm when it contacts the face

また、アームの手先位置によっても接触伝達エネルギーが変わるため、 $r_E$ が1以下となる可動範囲でアームを使用するという運用方法も考えられる。さらに、人体の部位によって、接触許容エネルギーが異なるため、人との作業空間を考慮し、接触可能性部位に応じた特性とすることも考えられる。例えば、Fig.2.10に接触許容エネルギー内でのアーム手先最大速度 ( $r_E=1$ の場合に相当) の分布をプロットしたものを示す。Fig.2.10(a)は上腕接触を考慮した場合、Fig.2.10(b)は顔接触を考慮した場合を示している。このように、接触部位毎のアームが出せる手先最大速度の分布を求めることができる。

以上のように、アームの質量特性をもとに、アームの可動範囲にわたって、 $r_E$ を求めてアームの接触エネルギーの評価を行うことによって、アームの接触安全性の評価を行うことができる。次章以降では、これを用いて開発したアームについてそれぞれ評価を行っていく。なお、開発したアームの評価においては、すべての3次元姿勢を考えると計算量が膨大になり、また、特性結果の表現も複雑になるため、本論文ではアームの特性の概略を把握できるようにするために各アームの初期姿勢は2次元平面上にあるものとして行っていく。

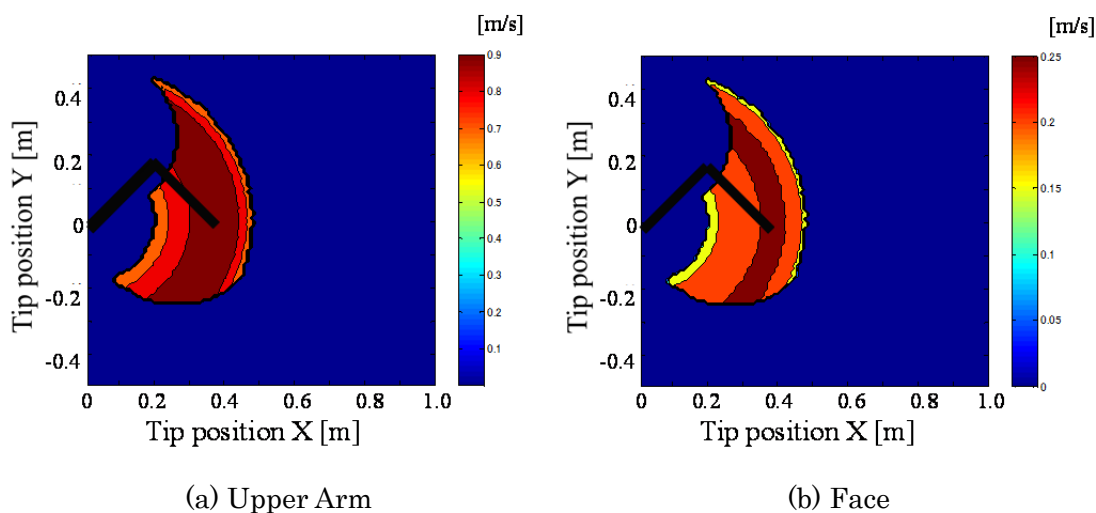


Fig.2.10 Max Velocity

## 2.3 安全に関する質量特性評価手法の提案のまとめ

本章ではロボットアーム機構の安全に関する評価手法の一つとして，ロボットアームの評価指標および安全に関する国際規格の動向を整理し，多関節アームに対応可能な痛覚耐性に基づく質量特性の評価手法を提案した．これは，アームの質量特性を元に接触点における仮想質量を算出し，接触部位を考慮した換算質量に変換，接触伝達エネルギーを求め，各部位毎の許容エネルギーを超えるかどうかを基準とするものである．アーム手先位置による仮想質量の分布から，接触時の危険度の分布がわかり，その位置で出せる手先最大速度も算出できる．さらに，関節速度と伝達エネルギーの関係も求めることができる．第3章および第7章でこの手法を用いて，実際に試作したロボットアームの質量特性の評価を行っていく．

## 第3章 モータ関節配置型アームの開発と 問題点

本章では2章で提案したアームの安全に関する質量特性評価を実際に行って基準とするための、モータ関節配置型アームの開発と評価について述べる。このアームはモータを各関節に配置した標準的なタイプのアームである。本アームの開発目的は、家庭内での軽作業実現のため、部屋間移動のためのドア開けや、スイッチ ON/OFF、窓・鍵開閉、対象物操作などを行える、移動ロボットに搭載するためのアームである。このアームの概要について述べ、2章で述べた質量特性の評価を行う。この評価を基に次章以降のアーム設計指針を策定し、次章以降のアームの評価の基準とする。

### 3.1 モータ関節配置型アームの機構

開発したモータ関節配置型アームの特徴を以下に示す。

- ・手先での把持物体の質量： 約 500g, 開閉量： 60mm
- ・肩3+肘1+手首2+手先グリップの6自由度+開閉式グリップからなる自由度構成  
このアームのサイズは人間の腕より少し小さいサイズ（子供の腕と同程度）としている
- ・ドアノブ、机の上のもの、床のもの等を扱えるような広い作業範囲をもつ  
Fig.3.1 にドア開閉のためにドアノブを操作しているイメージ図, Fig.3.2 に机の上のものを扱っているイメージ図, Fig.3.3 に床のものを拾っているイメージ図を示す。今までの多くのアーム付ロボットでは、ドアノブを扱うことはできても、床までは手が届かないものが多かったが、このアームは床にも手が届き、広い作業範囲を持つ。
- ・アームは本体内に収納可能

家庭内での使用を想定した場合、できるだけコンパクトにしなければならないということ、人に危害を加えないように安全な機構としなければならない。そこで、アームの第2、第4、第6関節の可動範囲を広く取り、アームが胴体の中に完全に収納できるようにした。以上の検討結果をもとに策定したアームのリンク長および関節可動範囲を Fig.3.4 に示す。なお図中の可動範囲の数値は、ソフトリミットを示しており、

カッコ内の数値はメカリミットを示している。

また、Fig.3.5 にアーム機構の外観を示す。さらに、Table 3.1 にアームと各関節軸の詳細仕様を示す。

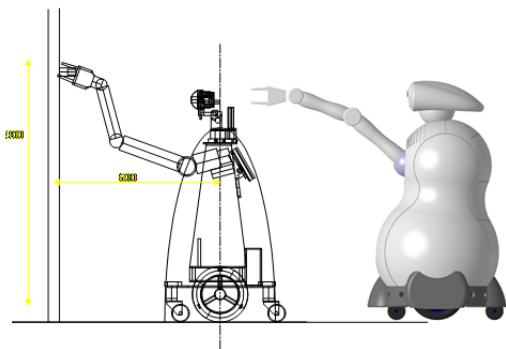


Fig.3.1 Door Opening

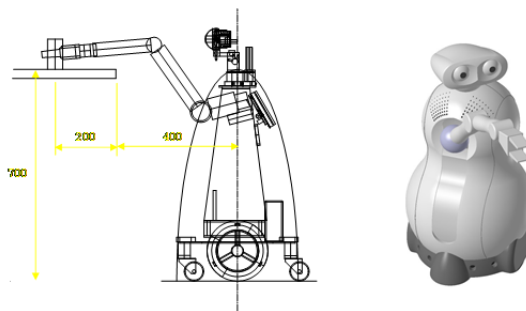


Fig.3.2 Handling

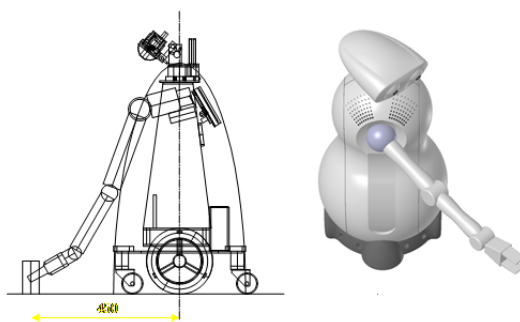


Fig.3.3 Picking up

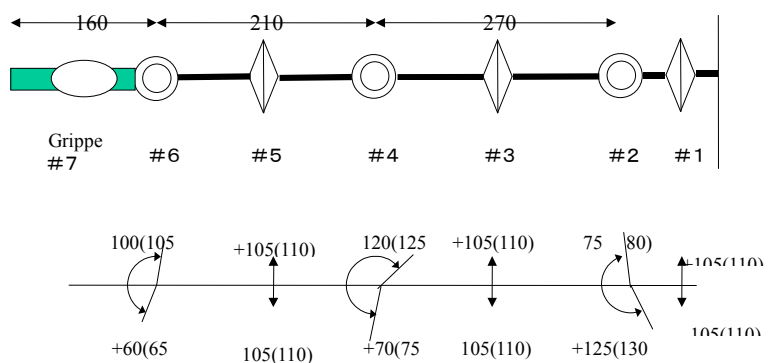


Fig.3.4 The store state in the robot body and the movable range



Fig.3.5 Arm mechanism

Table 3.1 Specification detail of the arm

軸	可動範囲 (メカリミット) [deg]	モータ				減速機			トルクリミッタ	定格関節 速度[° /s]	連続最大関 節 トルク[Nm]	関節最大負荷 トルク※[Nm]
		モータ型番	最大連続 トルク[Nm]	定格回転数 [rpm]	重量 [kg]	形式	減速比	効率				
1	+110~-110	Amax32 20W	0.0445	4200	0.242	プーリ(1:3) CSF17(1:100)	3×100 =300	0.9 ×0.7	MSC-6-A (0.078~1.32Nm)	84	8.41	11.56
2	+130~-80	Amax32 20W	0.0445	4200	0.242	プーリ(1:2.5) CSF17(1:120)	2.5×120 =300	0.9 ×0.7	MSC-6-A (0.078~1.32Nm)	84	8.41	11.56
3	+110~-110	Amax26 11W	0.0157	6600	0.119	ギアヘッドGP26B(1: 3.8)CSF11(1:100)	3.8×100 =380	0.84 ×0.7		104	3.51	4.02
4	+75~-125	RE25 10W	0.0293	3600	0.130	ベベル(1:2) CSF11(1:100)	2×100 =200	0.9 ×0.7		108	3.69	4.02
5	+110~-110	REmax24 6.5W	0.0101	6000	0.071	CSF8(1:100)	100	0.7		360	0.71	0.78
6	+60~-100	REmax21 3.5W	0.00587	5500	0.043	ベベル(1:2) CSF8(1:100)	2×100 =200	0.9 ×0.7		171	0.74	0.78
7	グリップ用	Amax16 2W	0.00266	8000	0.022	ギアヘッドGP16A(1:5.4)						

※グリップで500g  
の物を持ち、腕を  
水平にまっすぐ伸  
ばしたときのトルク

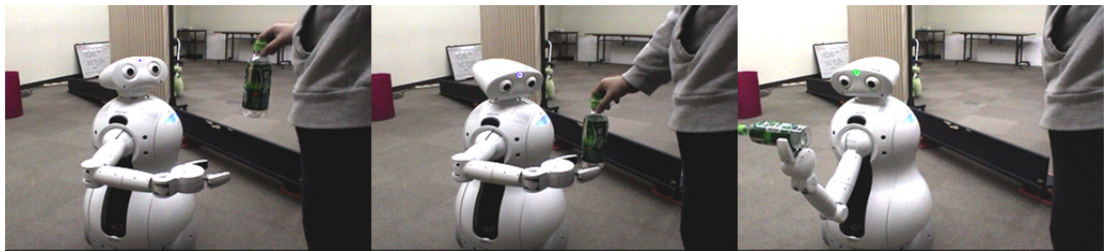
実際に本アームを移動ロボットに搭載し、動作させた様子を Fig.3.6~Fig.3.8に示す。Fig.3.6はアームを胴体から出し、人を見つけて人のほうに向かい、ペットボトルを掴む動作を示す。また、Fig.3.7は目的の人をみつけ、ペットボトルを持って行く動作を示している。Fig.3.8はゴミ箱をみつけ、ペットボトルを捨てに行く動作を示している。このように移動ロボットに搭載して、家庭環境で物体の把持、ピックアンドプレイスを行えるアームであることを確認した。



(a)

(b)

(c)

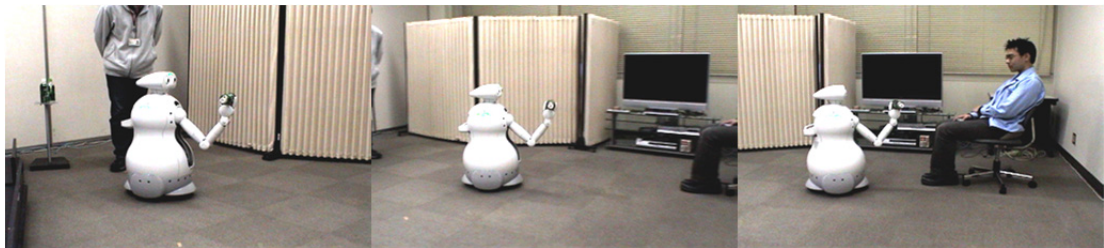


(d)

(e)

(f)

Fig.3.6 The scene that the robot finds a person and grasps a plastic bottle



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

Fig.3.7 The scene that the robot finds a person and takes a plastic bottle to him



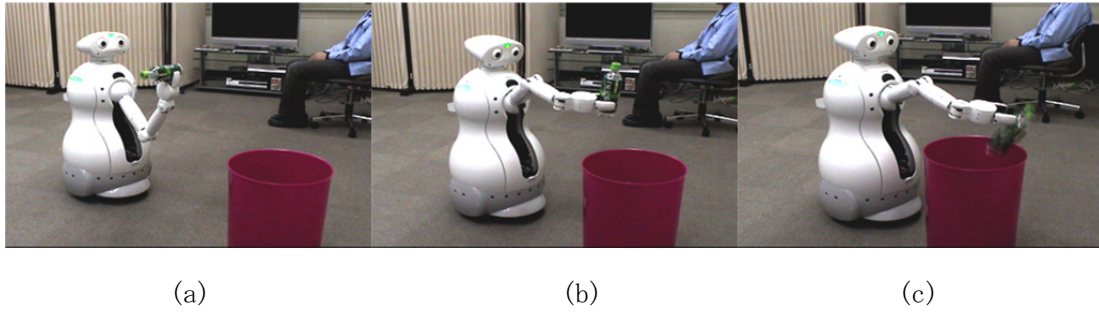


Fig.3.8 The scene that the robot finds a trash can and goes to throw away a plastic bottle

### 3.2 モータ関節配置型アームの質量特性評価と接触許容速度

本アームのように人の傍で動作する場合、どのくらいのアーム速度までなら安全なのかが問題になる。遅いほど安全ではあるが、作業速度が遅く実用的でなくなり、さらに人に不快感を与える。そこで、2章の手法で質量特性を求めて、痛覚耐性に基づく許容エネルギー評価を行う。

本アームの質量特性の算出および許容エネルギー評価は以下の条件において行う。

- ・手首の2軸分の関節は固定とする。手先速度への影響が大きい、肩と肘の合計4軸分の関節を動かすものとして行う。
- ・力の作用点はハンドの先端とする。作用点の並進速度を考える。

まず、本アームの質量特性を評価する。座標系を Fig.3.9 のようにDH法で設定し、図のようなリンクパラメータとする。

i	c [mm]	$\alpha$ [deg]	d [mm]	$\theta$ [deg]
1	0	0	0	$\theta_1$
2	0	-90	0	$\theta_2$
3	0	90	270	$\theta_3$
4	0	-90	0	$\theta_4$

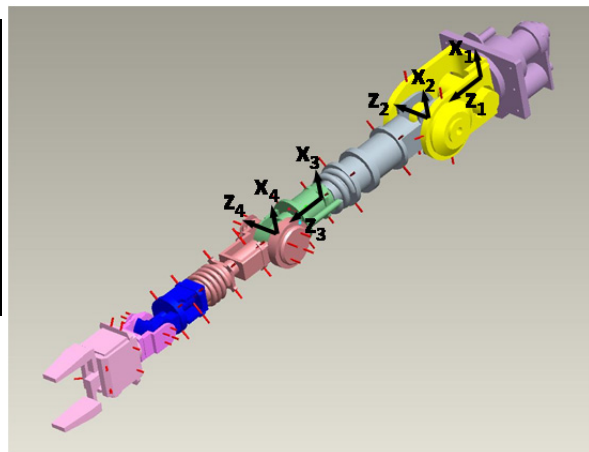


Fig.3.9 Link Parameter

ここで、x 軸回りの回転行列を  $\mathbf{R}_x(\theta)$ ，z 軸回りの回転行列を  $\mathbf{R}_z(\theta)$  とすると、それぞれ式(3-1)のように表される。

$$\mathbf{R}_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

第 i 軸の方向から第 j 軸の方向への回転行列を  $\mathbf{R}_j^i$  とすると、それぞれの回転軸の方向の変換行列は式(3-2)のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_1^2 &= \mathbf{R}_z(\theta_1) \mathbf{R}_x(-90) \\ \mathbf{R}_2^3 &= \mathbf{R}_z(\theta_2) \mathbf{R}_x(90) \\ \mathbf{R}_3^4 &= \mathbf{R}_z(\theta_3) \mathbf{R}_x(-90) \end{aligned} \quad (3-2)$$

よって各軸の方向ベクトル  $\mathbf{a}_i$  をベース座標系で表すと、式(3-3)のようになる。

$$\mathbf{a}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_2 = \mathbf{R}_1^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_3 = \mathbf{R}_1^2 \mathbf{R}_2^3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_4 = \mathbf{R}_1^2 \mathbf{R}_2^3 \mathbf{R}_3^4 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

各リンクの重心を原点として、座標軸の方向を各軸の座標系にとった各リンクの慣性テンソルを CAD モデルより算出し、ベース座標系に変換したものを  $\mathbf{I}_i$  [kgm<sup>2</sup>] とすると、それぞれ式(3-4)のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \begin{pmatrix} 0.00722 & 0.00032 & 0.00011 \\ 0.00032 & 0.00801 & 0.00023 \\ 0.00011 & 0.00023 & 0.00295 \end{pmatrix} \\ \mathbf{I}_2 &= \mathbf{R}_1^{2T} \begin{pmatrix} 0.00234 & 0.00022 & 0.00014 \\ 0.00022 & 0.00257 & 0.00008 \\ 0.00014 & 0.00008 & 0.00048 \end{pmatrix} \mathbf{R}_1^2 \\ \mathbf{I}_3 &= (\mathbf{R}_1^2 \mathbf{R}_2^3)^T \begin{pmatrix} 0.00024 & 0.00002 & 0.00004 \\ 0.00002 & 0.00026 & 0.00003 \\ 0.00004 & 0.00003 & 0.00019 \end{pmatrix} \mathbf{R}_1^2 \mathbf{R}_2^3 \\ \mathbf{I}_4 &= (\mathbf{R}_1^2 \mathbf{R}_2^3 \mathbf{R}_3^4)^T \begin{pmatrix} 0.07635 & 0.00157 & 0.00104 \\ 0.00157 & 0.00336 & 0.00121 \\ 0.00104 & 0.00121 & 0.00784 \end{pmatrix} \mathbf{R}_1^2 \mathbf{R}_2^3 \mathbf{R}_3^4 \end{aligned} \quad (3-4)$$

各軸の座標変換行列は式(3-5)で表され、

$$T_i^{i-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & c_i \\ \cos \alpha_i \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i & -d_i \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \cos \theta_i & \cos \alpha_i & d_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

各軸の座標系で表した重心座標を  $l_{gi}$  とし、同次座標表現を

$$\mathbf{l}_{gi}' = \begin{pmatrix} l_{gi} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

とすると、関節軸  $j$  からリンク  $i$  の重心までのベクトル  $\mathbf{r}_{ji}$  の同次座標表現  $\mathbf{r}'_{ji}$  は式(3-7)のように表される。

$$\begin{aligned}
\mathbf{r}'_{11} &= \mathbf{T}_1^0 \mathbf{l}_{g1}' \\
\mathbf{r}'_{12} &= \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{l}_{g2}', \quad \mathbf{r}'_{22} = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{l}_{g2}' - \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
\mathbf{r}_{13} &= \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{l}_{g3}', \quad \mathbf{r}_{23} = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{l}_{g3}' - \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}_{33} = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{l}_{g3}' - \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
\mathbf{r}'_{14} &= \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T}_4^3 \mathbf{l}_{g4}', \quad \mathbf{r}'_{24} = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T}_4^3 \mathbf{l}_{g4}' - \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \\
\mathbf{r}'_{34} &= \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T}_4^3 \mathbf{l}_{g4}' - \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{r}'_{44} = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T}_4^3 \mathbf{l}_{g4}' - \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T}_4^3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-7)
\end{aligned}$$

よって、式(2-9)と同様に計算してアーム全体の慣性テンソル  $\mathbf{H}$  を求めることができる。次に、ベース座標で表した手先位置  $\mathbf{x}$  の同次座標表現を  $\mathbf{x}'$ 、第4軸の座標系で表した手先座標を  $l_{tip}$  とすると、

$$\mathbf{x}' = \mathbf{T}_1^0 \mathbf{T}_2^1 \mathbf{T}_3^2 \mathbf{T}_4^3 \begin{pmatrix} l_{tip} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

式(3-8)よりヤコビ行列  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$  が求まる。アーム手先座標で見た、運動エネルギー  $S$  と慣性テンソル  $\mathbf{G}$  は、 $\mathbf{J}$  の擬似逆行列  $\mathbf{J}^+$  を用いて式(3-9)のように変換される。

$$S = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{G} \dot{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{G} = \mathbf{J}^{+T} \mathbf{H} \mathbf{J}^+ \quad (3-9)$$

これを用いて、式(2-10)と同様に計算して手先位置に関する一般化慣性楕円体が求まる。これよりアーム手先の接触方向の仮想質量が求まる。Fig.3.10に手先位置における仮想質量最大値の分布を示す。なお、2次元平面上(ベース座標系のZ-X平面)で傾向を確認するため、アーム姿勢の  $\theta_1$  と  $\theta_3$  は0とし、 $\theta_2$  と  $\theta_4$  を変えて解析を行った。また、アーム全体の仮想質量の傾向を定量化するため、この仮想質量の分布の可動範囲にわたる平均値をとって評価値とする。以降のアームの仮想質量の評価も平均値をとって行う。この仮想質量の分布の平均値をとると、3.57kgとなった。この分布をみると主に手先位置はアーム基部から最近傍

にある場合と、アーム基部から離れた位置にある場合に仮想質量が大きくなっていることがわかる。

さらに、許容接触エネルギー内での最大速度の分布をFig.3.11(上腕接触を考慮した場合)、Fig.3.12(顔接触を考慮した場合)に示す。ここで、アーム全体の許容最大速度の傾向を定量化するため、この許容最大速度の分布の可動範囲にわたる平均値をとって評価値とする。以降のアームの許容最大速度の評価も平均値をとって行う。Fig.3.11の許容最大速度の平均値は、0.58m/s、Fig.3.12の最大速度の平均値は、0.15m/sであった。よって、アームの全可動範囲に渡って、接触許容エネルギー以下に抑えようすると、この速度分布以下に抑えなければならない。特に顔への接触を考慮した場合、速度が遅く実用的ではない。

次にアームの関節速度で評価する。式(2-5)で表される接触許容エネルギーとの比率 $r_E$ を求めてプロットした結果を Fig.3.13, Fig.3.14 に示す。 Fig.3.13 は、上腕接触を基準として可動範囲にわたって $r_E < 1$ となる関節速度 ( $-52\text{deg/s} < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 52\text{deg/s}$ ) を全検索で求め、この速度条件のもとで $r_E$ をプロットしたものである。また、 Fig.3.14 は、顔接触を基準として可動範囲にわたって $r_E < 1$ となる関節速度 ( $-20\text{deg/s} < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 20\text{deg/s}$ ) を総当りの求め、この速度条件のもとで $r_E$ をプロットしたものである。この結果を見ると、 $\theta_2$  軸（グラフでは PositionX=0, PositionZ=0 の点に相当）から離れるにしたがってエネルギーは大きくなっており、さらに $\theta_1$  軸線上（グラフでは PositionX=0 の線に相当）から離れるにしたがってエネルギーが大きくなっている。また、アームの全可動範囲に渡って、接触許容エネルギー以下に抑えようすると、上腕の場合は各関節速度を 52deg/s 以下に、顔の場合は各関節速度を 20deg/s 以下にしなければならず、特に顔への接触を考慮した場合、速度が遅く実用的ではない。可動範囲のうち、接触エネルギーが低い領域で用いることも考えられるが、用途が限られてしまう。

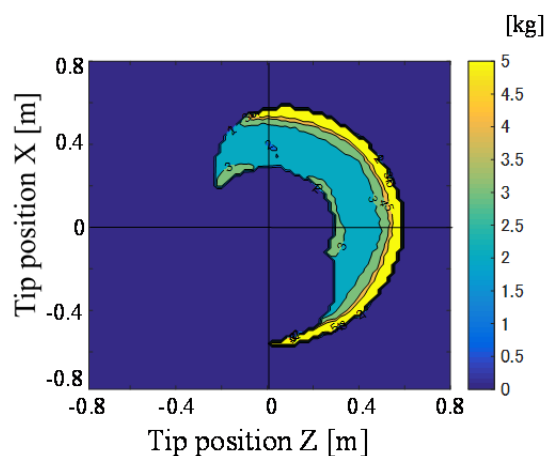


Fig.3.10 Virtual Mass (Average 3.57kg)

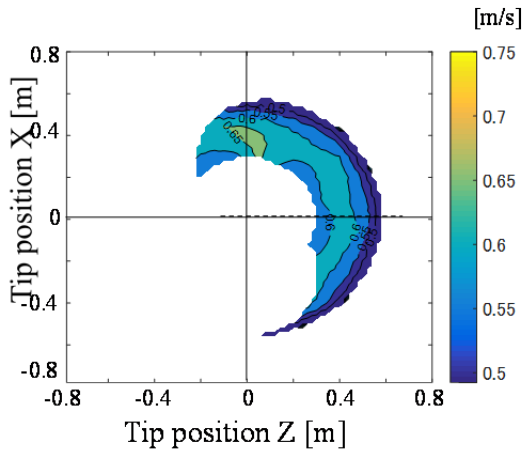


Fig.3.11 Max velocity (upper arm)  
(Average 0.58m/s)

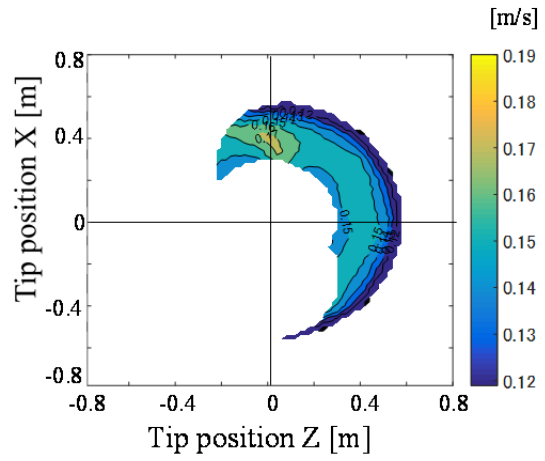
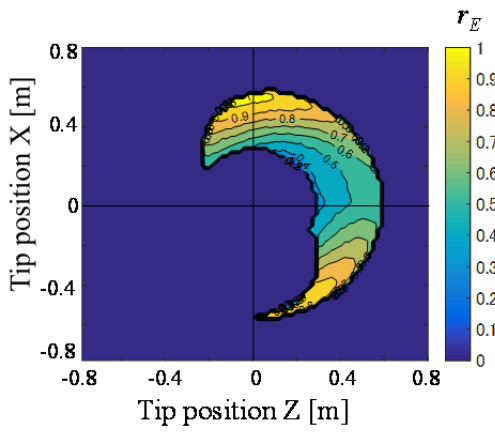
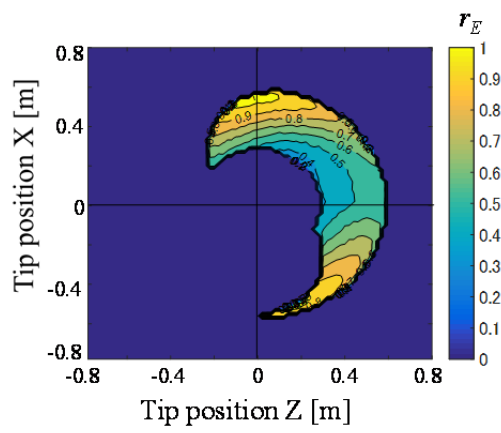


Fig.3.12 Max velocity (upper face)  
(Average 0.15m/s)



$\theta_1=0\text{deg}, -75\text{deg}<\theta_2<125\text{deg}, \theta_3=0\text{deg},$   
 $-120\text{deg}<\theta_4<-70\text{deg},$   
 $-52\text{deg/s}<\dot{\theta}_1,\dot{\theta}_2,\dot{\theta}_3,\dot{\theta}_4<52\text{deg/s}$

Fig.3.13 Evaluation result (upper arm)



$\theta_1=0\text{deg}, -75\text{deg}<\theta_2<125\text{deg}, \theta_3=0\text{deg},$   
 $-120\text{deg}<\theta_4<-70\text{deg},$   
 $-20\text{deg/s}<\dot{\theta}_1,\dot{\theta}_2,\dot{\theta}_3,\dot{\theta}_4<20\text{deg/s}$

Fig.3.14 Evaluation result (face)

### 3.3 モータ関節配置型アームの課題と新規アームの設計方針

開発したモータ関節配置型アームは、移動ロボットに搭載して家庭環境などでピックアップアンドプレイス作業を行ことのできる、省スペース性と十分な可動範囲を備えているが、実際に様々なピックアップアンドプレイス作業を行っているとなると実用的でない部分も分かってきた。そこで、より実用的なアームとするために Table 3.2 に示す新規アームの目標仕様を設定した。まず、前節で述べた顔接触を考慮した接触許容手先速度について、産業用ロボットの教示速度として遅すぎない速度として用いられている 250mm/s は平均速度として必要であると考えられる。なお、顔接触基準を選択したのは、体のパーツのうち最も接触許容手先速度が小さいためである。次に可搬重量については、家庭内でロボットに扱って欲しい物品の調査結果[3-1]より、1kg までの物品を扱うことができれば、全物品のうち 98%の物品を扱うことができることからこれを目標仕様とする。次にアームの想定搭載システムについては、Fig. 1.2 に示した我々の開発した W500×W500×H1000 のサイズの移動ロボットに搭載可能とする。また、アームの作業範囲としては、机の上等の物を持ち上げる、置くことができる範囲とする。さらに、把持対象物の形状としては、日用品、箱、トレイ、ボトルを持つことができるアームとする。

Table 3.2 Design Spec of Arm

安全性基準	顔接触を考慮した接触許容手先速度 250 mm/s
可搬重量	1.0 kg
想定搭載システム	W500mm×W500mm×H1000mmの サイズの移動ロボットに搭載可能
作業範囲	机の上等の物を持ち上げる、置く
把持対象物の形状	日用品、箱、トレイ、ボトルを持つ

この仕様に対して、基準アームでは以下の問題点があった。

- ① 接触安全速度が遅い  
顔接触を考慮した接触許容手先速度を考えると平均 150mm/s と遅く、動作に時間がかかり過ぎる。
- ② ペイロードが小さい  
用途を広げることを考えると 0.5kg までではなく、もっと重い物体を持てるようになる必要がある。
- ③ 様々な形状の物体、大きな物体を持てない  
用途を広げることを考えると様々な形状の物体や大きな物体を持てるようにすべきである。

以上の問題点に対応するためにはそれぞれ以下の方法が考えられる。

- ① アーム質量，イナーシャを減らす
- ② アーム質量，イナーシャを減らす，モータ出力（トルク）を上げる
- ③ 多自由度のハンドとする，双腕にする

さらに，ロボットの機構的安全対策（質量系の軽減，アクチュエータの低出力化，構造の小型化）を考慮したアームとしなければならないため，これらの機構的安全対策とのトレードオフが発生する，これらを考慮して，新規アーム機構開発の目的と対策をまとめると以下になる。

- ① 接触許容速度の向上  
→アーム質量，イナーシャを減らす
- ② ペイロードの向上  
→アーム質量，イナーシャを減らす，
- ③ 把持対象物の拡大  
→多自由度のハンド（ただし軽量な機構）とする

このうち本論文では，①，②に関しては，ワイヤ駆動アーム，重力補償アームを開発することにより実現し，②，③に関しては下面支持ハンド搭載アームを開発することで実現する。

### 3.4 モータ関節配置型アームの開発と問題点のまとめ

本章ではモータを各関節に配置した標準的なタイプで家庭内での軽作業実現のための移動ロボットに搭載用アームの開発と，その問題点について述べた。

開発したモータ関節配置型アームは，移動ロボットに搭載して家庭環境などでピックアッププレイス作業を行ことのできる，省スペース性と十分な可動範囲を備えているが，2章で提案した，アームの安全に関する質量特性の分析により，顔接触許容速度が 150mm/s とかなり遅く，実用的でないことが分かった。さらに用途を広げるためには，ペイロードの向上，対象把持物の拡大が必要であることが分かった。そこで次章以降ではこれらの問題に対処するための，ワイヤ駆動アーム，重力補償アーム，下面支持ハンド搭載アームの開発およびその評価について述べていく。

## 第4章 ワイヤ駆動アームの開発

### 4.1 ワイヤ駆動アーム開発の目的

作業を行うアームの小型軽量化として、アームの関節駆動方式に着目すると、モータをアームの根元に配置し、ワイヤで関節に動力を伝達するワイヤ駆動方式が考えられる[4-1]. 人の傍で動作するワイヤ駆動アームの長所として、アーム関節の軽量化の他にも、ワイヤが低剛性であるため、物体や人との衝突時にも、衝撃を吸収できることが挙げられる[4-2]. また、アクチュエータ関連の配線を、アーム中に通す必要がなく、アーム構造の簡素化、配線の断線等に対する信頼性向上が期待できる. さらに、減速機がアーム関節部にないので、駆動音が小さく、人に与える不快感が抑えられることも挙げられる. 一方、短所としては、ワイヤの性質から、ワイヤ張力調整機構など、メンテナンス性を考慮した設計が必要であることが挙げられる. また、アーム姿勢や手先負荷に応じて張力が変化するため、ワイヤの伸びやたるみが発生して関節の位置ずれが生じ、動的には振動、時間遅れが生じることが挙げられる.

そこで、本研究ではこれらの課題にも対処した、小型軽量ワイヤ駆動アーム(Fig.4.1)の開発について述べる. 本アームは、家庭、公共施設環境で、物を持ち上げて、運び、別の場所へ置くことのできる、移動ロボット搭載型のアームを想定している. 目標仕様を Table 4.1 に示す. 3章で述べた通り、顔接触許容平均速度は 250mm/s とし、可搬質量は 1kg とする. モータ出力（トルク）については、機構的な安全対策を考慮して、モータ関節配置型アームよりも低くなることを目標とし、可動範囲についてはモータ関節配置型アームと同程度の手先到達範囲とする.

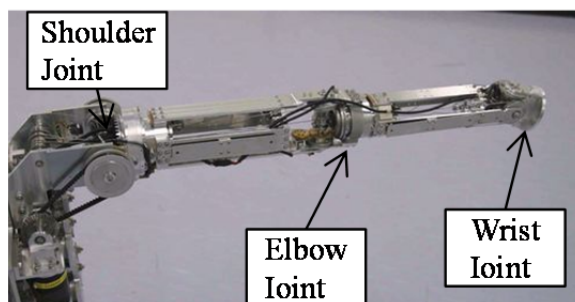


Fig.4.1 The wire-driven arm



Table 4.1 Design Spec of Wire Arm

項目	仕様
顔接触許容速度	250 mm/s
可搬重量	1 kg
モータ出力(トルク)	13.1 Nm以下 (モータ関節配置型アームよりも低くする)
可動範囲	最大到達距離 640mm (モータ関節配置型アームと同程度)

従来から様々なワイヤ駆動アームが開発されてきているが、機構的な安全対策を考慮すると以下のような問題があった。

- ① ねじり関節を入れようとすると、ワイヤ経路が複雑になり、構造が大きく、重くなる
- ② テンショナーの配置に場所をとり、構造が大きく、重くなる
- ③ 基部のモータ配置部が大型になり、移動ロボット搭載に適さない、ロボットの胴体がアームと干渉するため、アームリンク長を長くしなければならない

そこで、本研究ではそれぞれの問題に対して以下の機構を提案する。

- ① ワイヤ経路の工夫、ワイヤ自由度配置、絞り機構  
ねじり関節に対応し、構造をコンパクトにできる構成と配置を提案する。
- ② 張力自動調整機構  
コンパクトな構成でワイヤ張力がモータ起動時に自動調整される機構を提案する。
- ③ オフセット関節  
ロボット胴体との干渉を避け、可動範囲に対するアームリンク長を短くて着るオフセット関節機構を提案する。

なお、それぞれの提案機構と機構的な安全対策との関係を Table 4.2 に示す。

Table 4.2 Relationship between Mechanical Features and Safety Measure Items

	質量の低減	モータ低出力化	構造の小型化
①ワイヤ経路の工夫、ワイヤ自由度配置、絞り機構	○		○
②張力自動調整機構	○		○
③オフセット関節			○

本章では、4.2 節で①と③に関連するアームの基本機構およびサービスロボット搭載型ワイヤ駆動アーム設計と動作検証について述べる。次に、4.3 節では②の関連するワイヤの伸びに対応した、張力補償制御について述べる。4.4 節では、アームのワイヤの伸びやたるみに対応した制御手法について述べる。4.5 節では、ワイヤ駆動アームの仕様を 3 章のモータ関節配置型アームと比較し、その特性評価結果について述べる。

## 4.2 ワイヤ駆動アームの機構

これまでにワイヤ駆動の多関節アームは多く提案されているが（例えば[4-3],[4-4]），本研究では，生活空間内で人が行う作業をロボットが代わりに行うことを想定して，人の腕とほぼ同じ関節配置とした．製作したワイヤ駆動アーム試作機の外観とモータ位置，および関節配置を Fig.4.2 に示す．本機は，ベース部に6つのモータ，減速機が納められており，ワイヤで駆動するのは肘1自由度と手首3自由度の計4自由度である．この4自由度のみワイヤ駆動としたのは，アーム上腕部，前腕部にモータおよび減速機を配置しないことで重量，慣性モーメントをできるだけ小さくでき，かつ機構が複雑になりすぎないことを考慮したためである．

Fig.4.3 にワイヤ経路および，各関節の回転方向，プーリ配置を示す．特徴は軽量かつプーリの数を減らす構成とし，ねじり方向の回転関節（Joint No.3,5）をワイヤが通過するため，できるだけコンパクトにして，関節が回転した時のワイヤ長変化を少なくする絞り機構を備えることである．これは Fig.4.3 の中に示すように4つの自由回転プーリでワイヤを回転軸付近に絞っている．それぞれのワイヤはモータから所定の関節のプーリまで，各関節を通過しながら接続されている．各関節通過時には，関節回転軸と回転軸が同一の自由回転プーリもしくは，絞り機構を介する．このため，各モータ軸の回転角度と関節回転角度は1対1対応ではなく，他軸と干渉する．これにより，各モータを協調して制御しなければならないが，一方で適切に協調制御することにより，各モータ出力を効率良く使用できる可能性もある[4-5],[4-6]．

また本ワイヤ駆動アームと，各関節にアクチュエータを組込んだアームを比較した場合，動力に関連する機構要素はプーリのみになるので，加工部品形状が簡素化され，コストダウンを期待できる．さらに，アクチュエータ関連の配線も，アームの中を通して本体まで接続する必要がなく，この面でもアームの軽量化，配線の断線に対する信頼性向上に役立つ．また，ワイヤが低剛性であるため，物体や人との衝突時にも，衝撃を吸収することができる．

以上のワイヤ経路の工夫，ワイヤ自由度配置，絞り機構によって，質量の低減と構造の小型化を実現している．

次に本アームの移動ロボットへの搭載を考える．施設などでの軽作業支援においては，机上および床のものまで扱える作業範囲が必要となってくる．この作業範囲を確保するために，ロボットを大きくしてしまうと，施設内でスペースをとって邪魔になる可能性があり，また，大きいアーム，ロボットは出力も大きくなり，質量も増大するので接触時などの危険性が増してしまう．そこでロボットの設計方針として，できるだけロボット本体サイズは小さく，アームの長さを短くしつつも，机上，床のものを扱う作業が行えることとした．試作したロボットを Fig.4.4 に示す．

本アームの関節配置的特徴として、1軸と2軸間にオフセットを設け、このオフセット部分に2～7軸の駆動モータを取り付けた。オフセットを設けることにより、1軸が回転することで、「肩」にあたる部分が胴体より前方に移動するため、アームとロボット胴体の

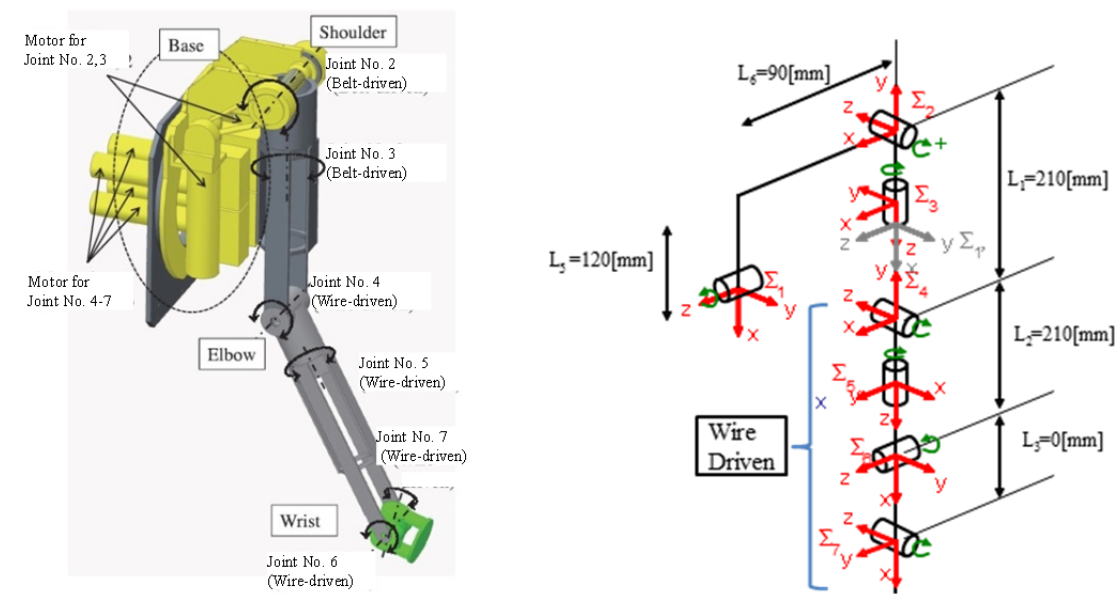


Fig.4.2 Outline of arm mechanism

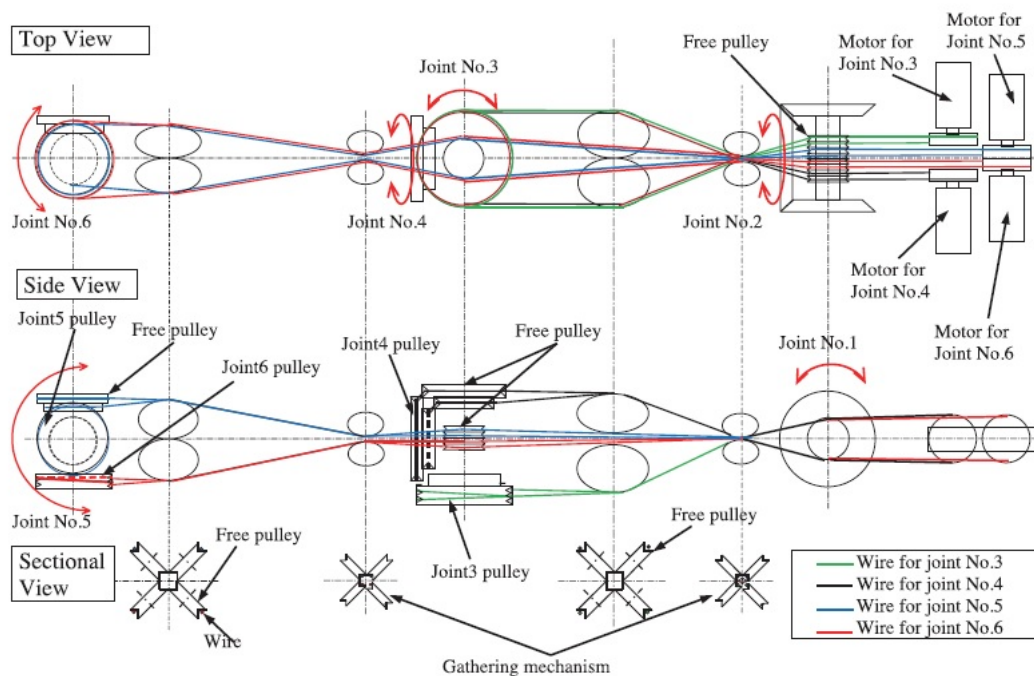


Fig.4.3 Path of the wire

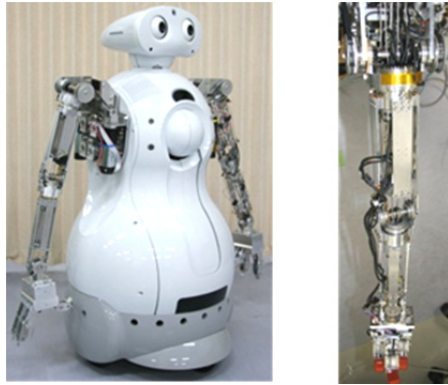


Fig.4.4 Mobile robot equipped with wire-driven arm

干渉を回避でき、アームの可動範囲が広がる。さらに、短いアームでも、1軸が動くことにより到達範囲を大きくとることができるという利点がある。ただし、オフセット量はあまり大きくすると、アームが大型になってしまうため、何らかの最適値が存在すると考えられる。今回は、ロボットのサイズから、胴体との干渉を避け、かつ床や机の上に届く可動範囲とできるオフセット量として120mmを設定した。Fig.4.5にオフセットがない場合とある場合の地面から750mmの高さ水平面での可操作度分布を示す。このように、オフセットを設けることで、特にロボット前方での可操作度が向上することがわかる。

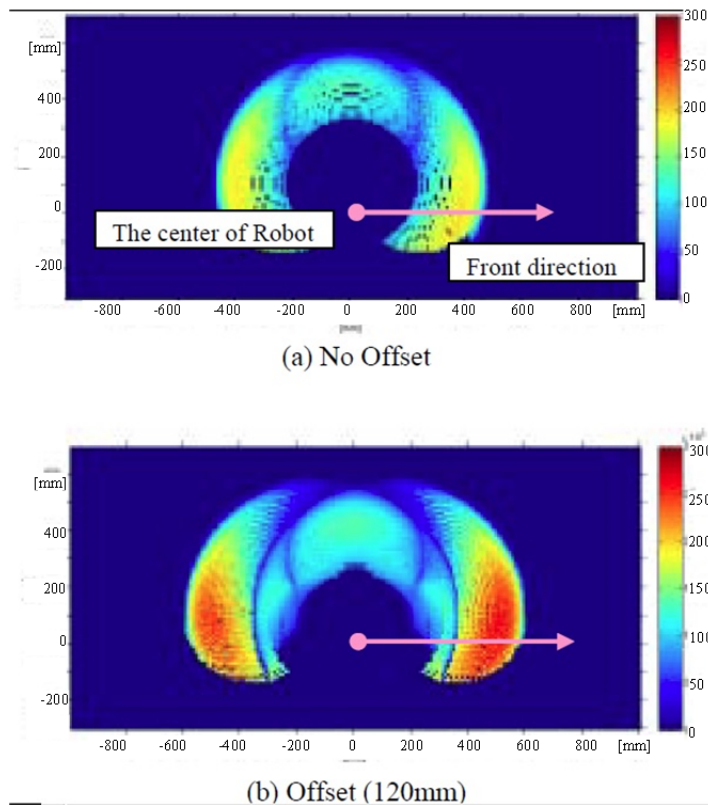


Fig.4.5 Manipulability of wire-driven arm

実際にアームをロボットに組込んでアームを動作させた様子を Fig.4.6 に示す. このように, 身長の高いロボットでも, 机の上や床までのアーム到達範囲を確保できる. さらに Fig.4.7 に実際にコップをハンドリングしている様子を示す. このように, 作業を行うのに十分な可動範囲を持っていることがわかる.

以上, 本オフセット関節は, 短いアーム長であっても作業のための可動範囲を確保できるため構造の小型化に効果がある.

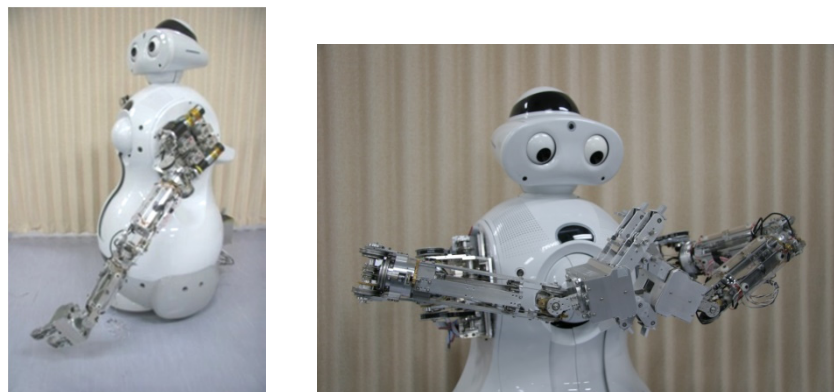
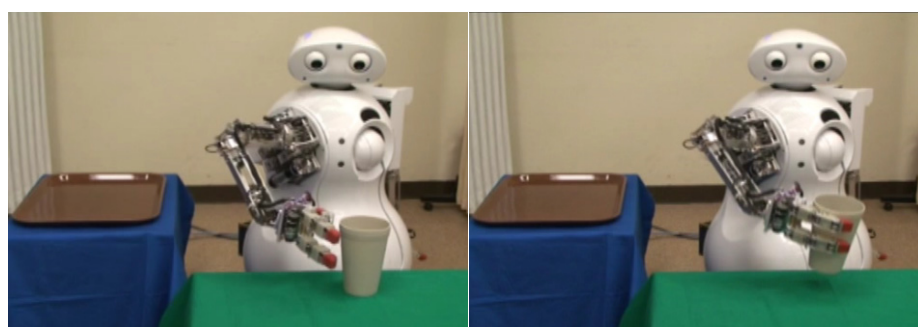
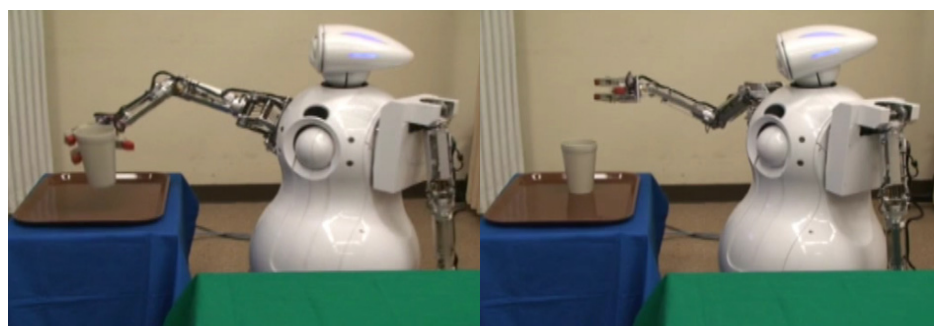


Fig.4.6 Motion of the arm



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig.4.7 Experiment of Handling a Cup

### 4.3 ワイヤ張力自動調整機構

ワイヤは使っているうちに徐々に伸びが発生し、このワイヤの伸びによりプーリ経路でのワイヤのゆるみ、たるみ発生し、関節剛性の低下や制御応答の低下が発生する。そのため、ワイヤ張力調整機構が必要となる。ワイヤ張力調整機構は、これまでもいくつか提案されている[4-7],[4-8]。しかしながら、本研究のように小型アームに適用する場合、アームリンク途中に構成することはスペース的に困難である。さらに、手動で張力調整を行うことはメンテナンス性の面で不便である。そこで、できるだけ張力調整用のアクチュエータを追加せずに、かつモータ近くのスペースに余裕がある場所に配置できるワイヤ張力の自動調整機構を提案する。

全体機構概要図と、モータ出力軸のプーリ部の概要図を Fig.4.8 に示す。モータ出力軸に、2本のワイヤをそれぞれに独立に巻き付けたプーリを、モータ軸固定時にワイヤを巻き取る方向にプーリが自由回転できるようにワンウェイクラッチを介して接続する。

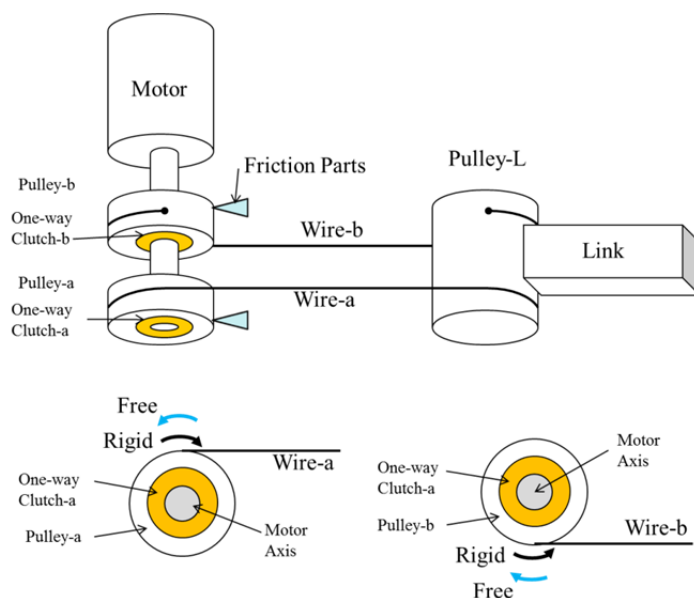


Fig.4.8 Outline of the mechanism

ここで、この構成によるワイヤ張力自動調整機構の動作の概念図を Fig.4.9 に示す。(a)は Wire-a, Wire-b ともにゆるみがあるとした初期状態を示している。ここから、(b)のようにモータ軸を Wire-a を巻取る方向に回転し始めると、ワンウェイクラッチを介して Pulley-a も Wire-a を巻取る方向に回転し、Wire-a のゆるみを除去する。このとき Pulley-L は、Wire-a のゆるみが除去され、Wire-a に張力がかかるまでは始動しない。また、Pulley-b は、Wire-b がゆるんだままであること、ワンウェイクラッチの自由回転、及び、Friction Parts の摩擦の影響により、モータ軸が回転しても、その場で停止したままとなる。さらにモータ回転を維持すると、(c)のように、Wire-a に張力がかかり、Pulley-L が始動する。こ

のときの **Pulley-b** はまだ**(b)**と同じ理由により、停止したままである。さらにモータ回転を維持すると、**(d)**のように **Wire-b** が **Pulley-L** に巻取られ、ゆるみが除去される。このように、常にモータ動作開始時にワイヤのゆるみを吸収し、張力を発生させることができる。

このようなワイヤの張力調整にワンウェイクラッチを1つ用いる方法は提案されているが[4-9]、本機構ではワンウェイクラッチを2つ用いることでモータ正転、逆転のどちらにおいてもワイヤの張力調整ができ、多自由度アームのように、アームの姿勢によりアームがどちらの方向にも回転する可能性のある場合に適している。

なお、実際にはワイヤの弾性やシステムの粘性等により、挙動に変化は出てくる。もし張力が高い状態でモータが始動した場合は、Fig.4.9 でモータ軸の始動、**Pulley-a** の始動とともに、**Wire-a**、**Wire-b** を介して **Pulley-b** が引張られ、**Pulley-a** と **Pulley-b** がほぼ同時に始動し始めるため、ワイヤの張力は始動前と始動後でほとんど変わらず、張力が過度に高くなることはない。

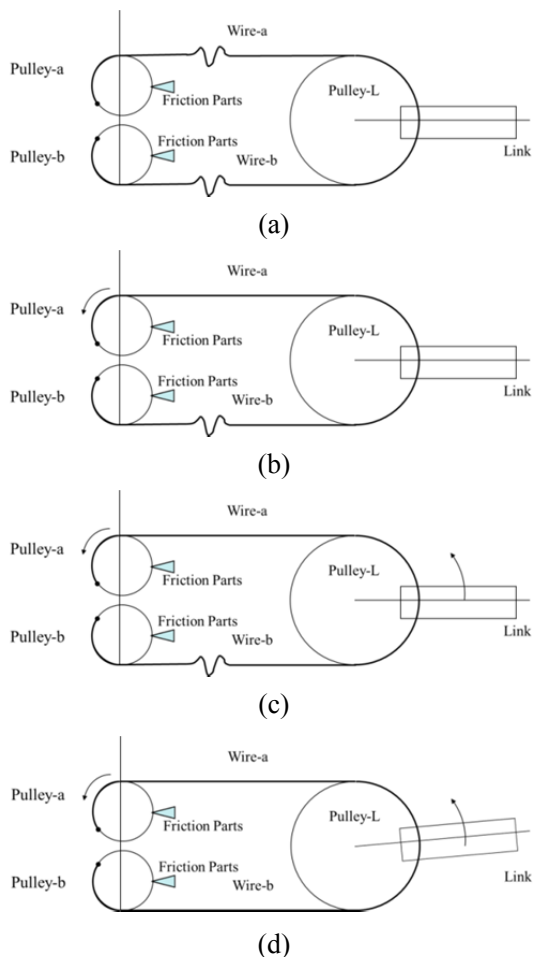


Fig.4.9 Motion of the mechanism

次に、本機構の詳細な挙動について以下、解析を行う。本機構の系を Fig.4.10 のようにモデル化する。なお、モータプーリ回転軸とアームプーリ回転軸は平行で共通の平面上にあるとし、重力方向はこの平面に垂直であるとする。ワイヤのゆるみのない状態を基準として、そこからモータが各ワイヤを巻き取った回転角を  $\theta_a$ ,  $\theta_b$ , ワイヤに発生する張力を  $f_a$ ,  $f_b$ , アームのプーリ半径を  $R$ , モータのワイヤ巻取半径を  $r$  とする。ワイヤに発生する張力は、ワイヤの縦弾性係数, 断面積, 歪をそれぞれ  $E$ ,  $A$ ,  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ , とし次式で表す。

$$\begin{aligned} f_a &= EA\varepsilon_a \\ f_b &= EA\varepsilon_b \end{aligned} \quad (4-1)$$

ワイヤに生じる歪は、アームとモータの回転角の相対差で生じ、ワイヤがたるんでいる時は0となる。ここで、ワイヤ方向を  $\gamma$ , 変位を  $u$ ,  $L$  をワイヤ長さとして、 $\partial u / \partial \gamma$  を  $\eta$  とし次式で近似する。

$$\begin{aligned} \eta_a &= \begin{cases} (r\theta_a - R\theta_L)/L & ; r\theta_a - R\theta_L > 0 \\ 0 & ; r\theta_a - R\theta_L < 0 \end{cases} \\ \eta_b &= \begin{cases} (-r\theta_b - R\theta_L)/L & ; -r\theta_b - R\theta_L > 0 \\ 0 & ; -r\theta_b - R\theta_L < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4-2)$$

したがって、有限歪を考慮する[4-10]と、

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial \gamma} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial \gamma} \right)^2 \quad (4-3)$$

であるから、式(4-1)は式(4-4)のようになる。

$$\begin{aligned} f_a &= EA(1 + \eta_a/2)\eta_a \\ f_b &= EA(1 + \eta_b/2)\eta_b \end{aligned} \quad (4-4)$$

さらに、ワンウェイクラッチをモデル化し、 $T_p$  をプーリの摩擦モーメント,  $I_p$  をプーリの慣性モーメントとすると、式(4-5)のように表せる

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_a = -f_a r / I_p - T_p \text{sign}(\dot{\theta}_a) \\ \dot{\theta}_a \leq \dot{\theta}_m \end{cases} \quad (4-5)$$

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_b = f_b r / I_p - T_p \text{sign}(\dot{\theta}_b) \\ \dot{\theta}_b \leq \dot{\theta}_m \end{cases}$$

またリンク側のプーリ周りの運動方程式は、系の粘性係数を  $D$  とし、式(4-6)のように表せる。

$$Rf_a - Rf_b - D\dot{\theta}_L = I_L\ddot{\theta}_L \quad (4-6)$$

式(4-2), (4-4), (4-5), (4-6)より、モータ角  $\theta_m$  の入力に対する各変数を求めることができる。



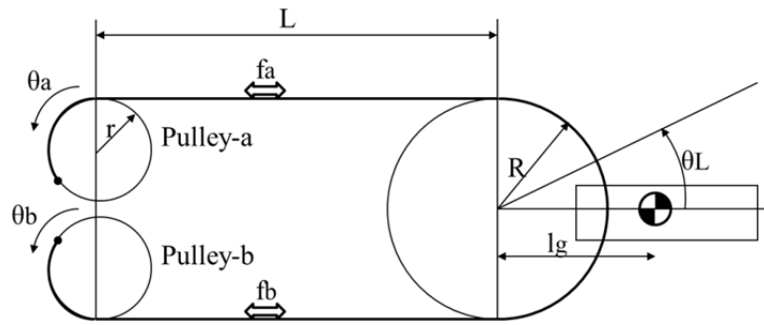


Fig.4.10 Model of the mechanism

モータ角  $\theta_m$  を動作させた時の各プーリ速度のシミュレーション結果を Fig.4.11 に示す. 各物性パラメータはカタログ値および測定値より次の値を用いた. ( $E = 42000 \text{ N/mm}^2$ ,  $A = 0.47 \text{ mm}^2$ ,  $r = 20\text{mm}$ ,  $R = 20\text{mm}$ ,  $L = 200\text{mm}$ ,  $I_p = 5000\text{kgmm}^2$ ,  $T_p = 0.2\text{Nmm}$ ,  $m = 0.5\text{kg}$ ,  $l_g = 100\text{mm}$ ,  $D = 450\text{kgmm}^2\text{s}$ ) また,  $f_a$  と  $f_b$  の初期張力はそれぞれ  $25 \text{ N}$  と  $0 \text{ N}$  とする. これは,  $f_a$  にはリンクの質量分の力がかかっているためである.

Fig.4.11 より, プーリ a の回転速度はモータ回転速度に追従しているが, プーリ b の回転は先述の動作概念の通り, 動作開始が遅れる. このときの各プーリ角度を Fig.4.12 に示す. プーリ b の回転角はモータ回転角とずれた値となる. さらに, このときのワイヤ張力の変化を Fig.4.13 に示す. 初期状態からモータ軸を動作させることにより, 張力が増加することがわかる. これは動作開始時にプーリ b の動作開始が遅れたことによって, ワイヤのゆるみが吸収されるためである. このように本機構により自動的に張力を調整し, ワイヤ張力を保つことができる.

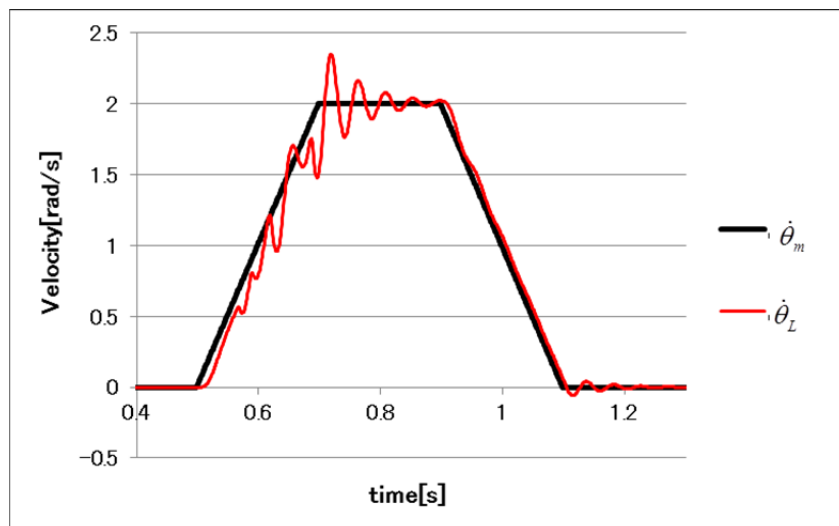


Fig.4.11 Simulation results of the speed of each pulley

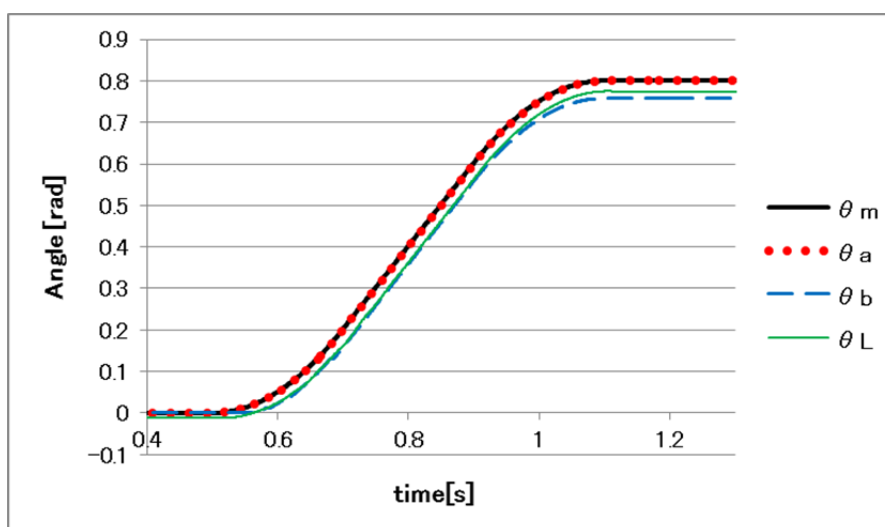


Fig.4.12 Simulation results of the angle of each pulley

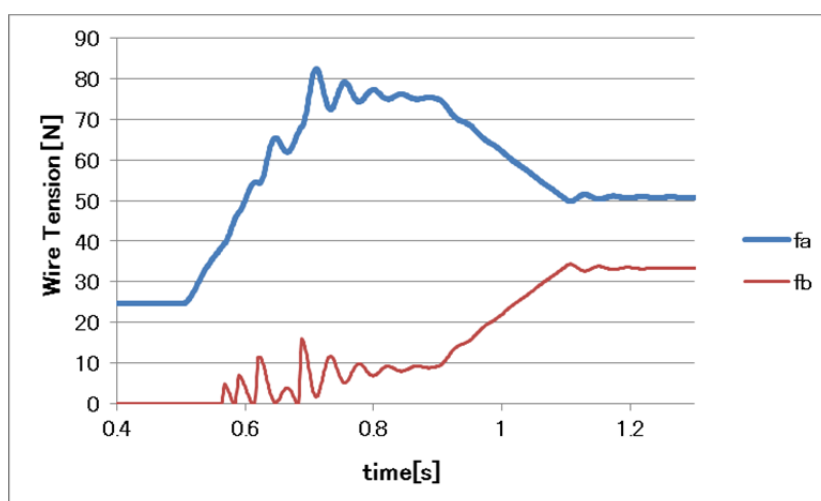


Fig.4.13 Simulation results of the tension of the wire

次に基礎実験を行った。Fig.4.14 は基礎実験装置を示している。実験では、ワイヤ張力が低い状態(20N)からモータを動作させた時のワイヤ張力の変化をフォースゲージにより測定した。Fig.4.16 に結果を示す。シミュレーション結果(Fig.4.13 の *fa*)と実験結果(Fig.4.15 の *fa*) を比較した場合、関節の始動と共にワイヤ張力が増加していること、関節の停止後に初期張力よりも高い張力に収束していることなどの特徴の一致が見られた。これにより、シミュレーションでの予測通りに、ワイヤにテンションをかけられることが確認できた。ワイヤにテンションをかけられることにより、アーム動作時の振動や時間遅れを軽減でき、常に始動時にテンションをかけられる本機構はメンテナンス性向上に有効である。

以上、少ない部品でコンパクトにモータ近くのスペースに配置できる張力自動調整機構を開発することにより、アームの質量の低減、構造の小型化を実現している。

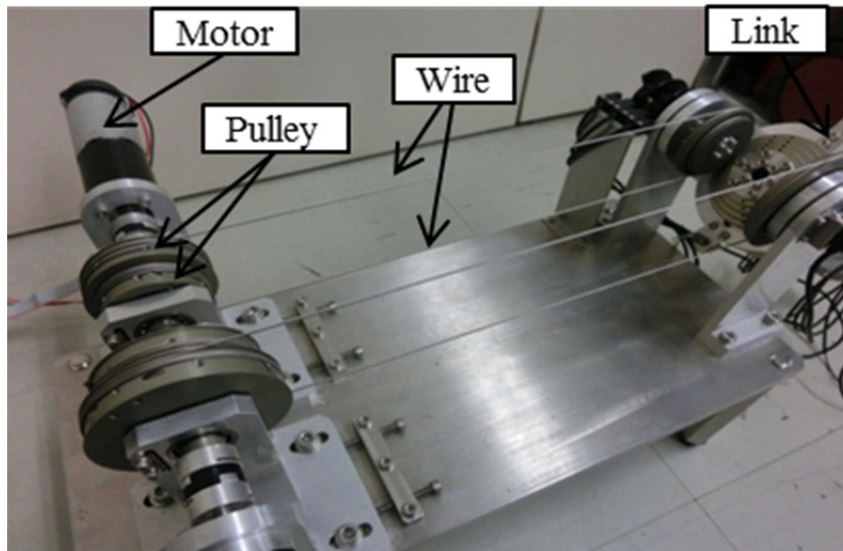


Fig.4.14 Basic experiment device

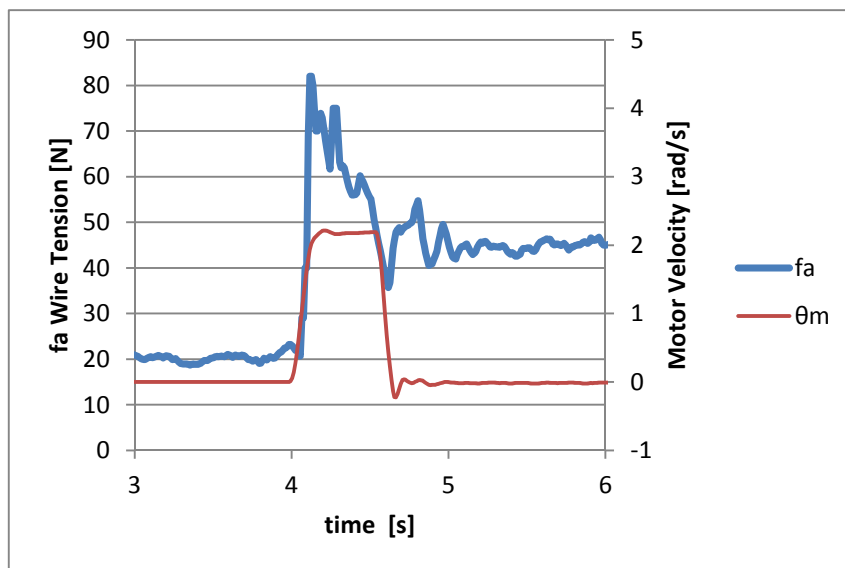


Fig.4.15 Experimental results of the tension of the wire

#### 4.4 ワイヤ駆動アームの制御

ワイヤはたとえ剛性が高い種類のものであっても、アームのリンク姿勢変化や手先負荷印加などによって張力が変動し、伸びが発生する。さらに多関節リンク構造においてはワイヤが関節を通過するごとに軸間干渉が生じてしまう。このように干渉機構はワイヤの動きを複雑にし、ワイヤの伸びや経路長変化も相まって、動作制御を困難なものにしている。本研究では機構干渉を干渉行列で表現し、モータ軸と出力軸である関節に取り付けたセンサ値をフィードバックさせた位置制御系を構築した。すなわち、関節軸間干渉を干渉行列を用いて非干渉化させ、モータ軸位置制御系へと帰着させ、モータ軸（エンコーダ）と出力軸である関節（ポテンショ）のセンサ値を他軸との干渉を考慮せずにそのまま利用可能とした。またアームの姿勢変化などで干渉行列が変化してしまい応答速度が落ちてしまうことから、干渉行列の変化量を算出し、モータトルク指令値に直接補償することで応答性の向上をめざす。

今、干渉を表す行列  $M_{ij}$  は Fig.4.16 に示す各ワイヤの経路上のプーリ比より求められ、モータ回転角を  $\theta_m$ 、関節回転角を  $\theta_j$  とし式(4-7)が成り立つ。この関係を用いて制御を行う。

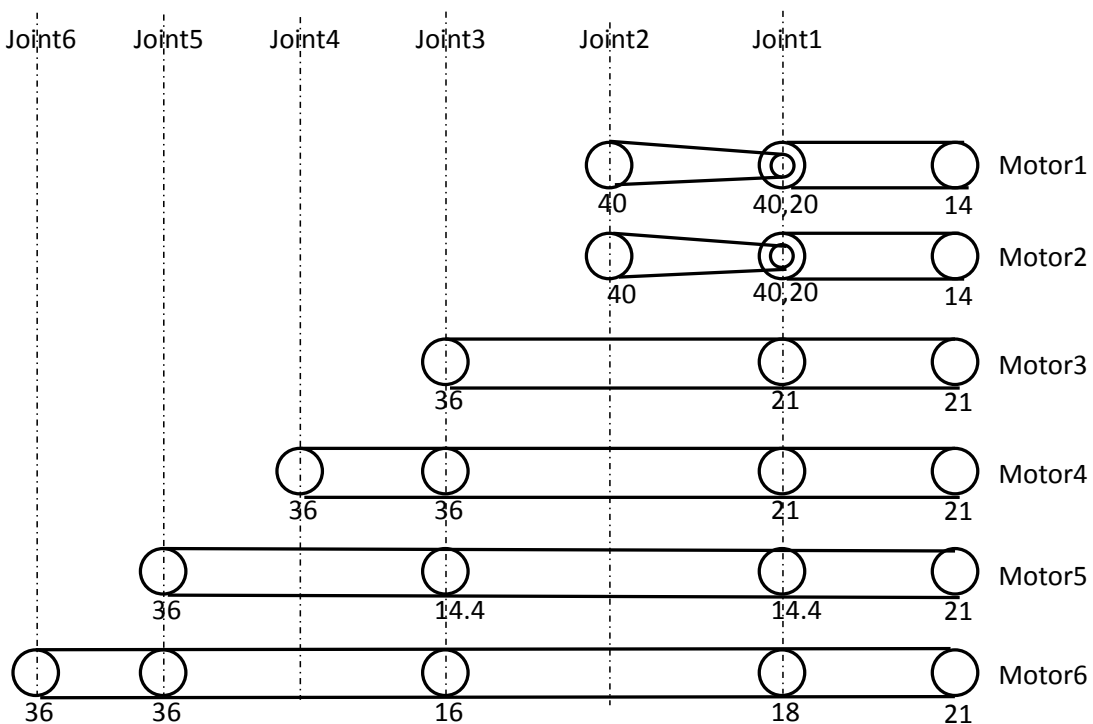


Fig.4.16 Pulley Diameters

$$\theta_m = {}^M T_J \cdot \theta_j \quad (4-7)$$

$${}^M T_J = \begin{pmatrix} 2.857 & -5.714 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.857 & 5.714 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1.71429 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1.714 & 1.714 & 0 & 0 \\ 0.6857 & 0 & 0.6857 & 0 & 1.714 & 0 \\ 0.8571 & 0 & 0.7619 & 0 & 1.714 & -1.714 \end{pmatrix}$$

干渉行列は、設計時の初期姿勢におけるプーリ径の比に基づいた幾何学的関係から算出されるため、ワイヤの経路長に変化がない場合に成立する。しかし実際にはアームのリンク姿勢変化や手先負荷印加などによって張力が変動し、ワイヤが伸びてしまい、経路長を一定に保つことは困難である。すなわち干渉行列はリンク姿勢変化や手先負荷印加時において変化するものである。特にワイヤの経路が長い手首関節においてその変化は大きく現れる。そこで干渉行列の変化量を調べた。位置制御系においては関節角偏差に干渉行列  ${}^M T_J$  をかけてモータ角偏差を求めた。式(4-8)のように、モータ角に逆行列  ${}^J T_M$  をかけたときの関節角は干渉行列によってモデル化された「推定関節角」と言える。

$$\hat{\theta}_j = {}^J T_M \cdot \theta_m \quad (4-8)$$

もし干渉行列が変化していなければ、推定関節角と各関節軸で観測された関節角は一致するはずである。Fig.4.17 に推定関節角(青色)を示しているが、設計初期姿勢である 0rad 付近では関節角(緑色)と比較的よく一致しているものの、初期姿勢から離れるほどに、特に正方向に離れると差が大きくなっているのが分かる。ただし推定関節角が関節角と一致していなくても定常偏差が発生していないのは、関節角偏差があればモータ軸角偏差も発生しモータ軸位置制御系がこれを 0 にするように制御するからである。

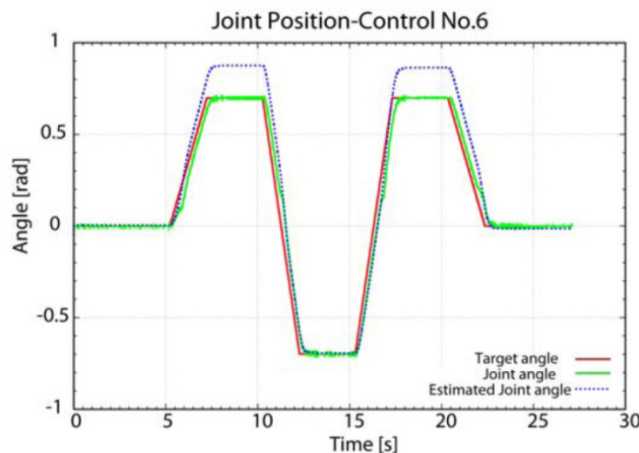


Fig.4.17 Position control result (Joint No.6)

干渉行列が変化した場合，モータトルク指令値に対して干渉行列変化量に基づいた補償量を加えることで制御応答性を向上させることを考える．モータトルクでの変位量を求めるため，式(4-8)の逆を取る．すなわち干渉行列 ${}^M T_J$ を用いて

$$\hat{\theta}_m = {}^M T_J \cdot \theta_j \quad (4-9)$$

としモータ角との偏差を干渉行列変化量と捉える．これに適切なゲイン  $K_M$  をかけた式(4-10) をモータトルク補償としてモータトルク指令値に直接加えている．

$$\tau_M = K_M (\hat{\theta}_m - \theta_m) \quad (4-10)$$

このときの制御ブロック図を Fig.4.15 に示す．

式(4-10)で定義したモータトルク補償付き位置制御系を用いて関節角位置制御実験を行った．実験では試作したアームに関節角指令値を与えた時の，関節角の制御応答性を計測した．制御応答性は整定時間で評価し，その定義を関節角偏差が目標値に対する許容範囲内(1%)に納まるまでの時間とした．モータから関節までのワイヤ経路長が最長で，制御応答性の低い，手首関節(第 6 軸)を動作させた時の整定時間をモータトルク補償の有無で比較した結果を Table.4.3 に示す．どちらの方向も 3 分の 1 以下に短縮できており，本制御法の有効性が確認できた．

以上，質量系の軽減のためにワイヤ駆動にすることによって生じる，制御性の問題を解決するアルゴリズムを開発した．

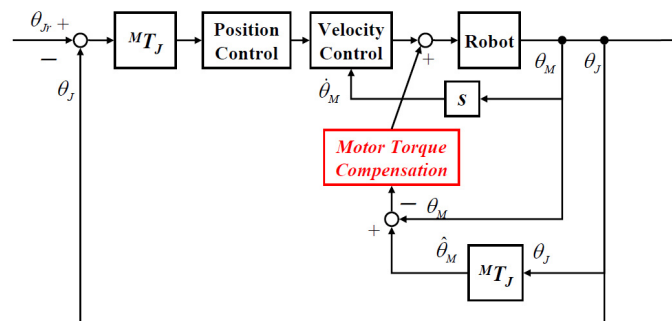


Fig.4.18 Block diagram of joint angle position controller with motor torque compensation

Table 4.3 Experimental results compared the settling time (Joint No.6)

Joint angle[deg]	Normal[s]	With motor-torque compensation[s]
30.0	0.379	0.111
-30.0	0.416	0.093

## 4.5 ワイヤ駆動アームの安全に関する特性評価

今回試作したワイヤ駆動アームと、3章で述べた各関節にアクチュエータを配置したアームの仕様の比較結果を Table 4.4 に示す。また、本アームの機構的特徴と、機構的安全対策との関係および評価を示す表を Table 4.5 に示す。まず、質量に関する項目については、3章のモータ関節配置型アームと比較して、ほぼ同じサイズながら、ワイヤ駆動アームの可動部は質量を-70%とすることができている。また、アームの自重が軽くなった分、ほぼ同じ出力のモータを使っていながら、アーム可搬重量はモータ関節配置型アームの2倍となった。次に、出力に関する項目については、静止時の最大関節トルク総和（アーム水平に真っ直ぐ伸ばした状態）で比較する。この結果より、関節トルク総和を-53%にできていることがわかる。さらに、ワイヤ駆動アームで最大可搬重量 1.0kg を持った時の関節トルク総和は、モータ関節配置型アームで何も持っていない状態よりも関節トルク総和が低くできていることがわかる。次に構造の小型化に関する項目については、アームの上腕径や前腕径をそれぞれ-10mm することができている。

本アームの提案機構のそれぞれの効果については、①ワイヤ経路の工夫、ワイヤ自由度配置、絞り機構が全体の質量の軽減、構造の小型化に貢献しており、②張力自動調整機構についてはテンショナー機構の分、質量の軽減、構造の小型化に貢献している。また、③オフセット関節については、4.2 節で述べたように、同じリンク長ながら、手先到達範囲が25%拡大しており、可動範囲を基準とすれば相対的に構造の小型化に貢献している。なお、これらの効果による質量特性を基にした接触許容速度の評価については、7章で他のアームとまとめて行う。

Table 4.4 Wire-driven type vs actuator mounted type

	モータ関節配置アーム	ワイヤ駆動アーム
可搬重量	0.5 kg	1.0 kg
全質量	4.0 kg	4.55 kg
可動部質量 (グリッパ除く)	3.0 kg	0.85 kg
必要モータ出力 (アーム自重のみの 最大静止トルク総和)	10.8 Nm	5.1 Nm
必要モータ出力 (最大可搬重量時の 最大静止トルク総和)	13.1 Nm (0.5kg)	9.6 Nm (1.0kg)
最大到達距離	640mm	700mm
アーム上腕部分径	φ70 mm	φ60 mm
アーム前腕部分径	φ60 mm	φ50 mm

Table 4.5 Relationship between Proposed Mechanism and Mechanical Safety Measure

	質量の低減	モータ低出力化	構造の小型化
ワイヤ駆動アーム全体	可動部質量 -70%	必要トルク -53%	アーム直径 -15%
①ワイヤ経路の工夫、ワイヤ自由度配置、 絞り機構	◎ 機構の工夫による 質量削減		◎ 機構の工夫による アーム直径削減
②張力自動調整機構	○ テンショナー分の 重量削減		○ テンショナー分のス ペース削減
③オフセット関節			○ 手先到達範囲 25%分拡大

#### 4.6 ワイヤ駆動アームのまとめ

本章では、人間共存ロボットのための軽量ワイヤ駆動アーム開発における、機構構成、ワイヤ張力自動調整機構および、トルク補償制御について述べた。構造の小型化のためのワイヤ経路の工夫、ワイヤ張力自動調整機構、オフセット関節によるリンク長減を示し、さらにモータの近くに配置でき、アクチュエータを必要としない、ワイヤ張力自動調整機構を提案し、実験により、ワイヤの張力を自動的に調整できることを確認した。これにより、テンショナーの小型化および、ワイヤのメンテナンス性の向上を実現した。また、モータ制御にトルク補償を導入し、これを用いない場合と比較して、整定時間を3分の1にできることを確認した。これにより、原理的には効率はよいが、協調制御が難しい干渉駆動系での実用的な制御法を実現できた。さらに、3章で述べたモータ関節配置型アームと比較し、質量の低減、モータ低出力化、構造の小型化について効果を確認し、提案機構のそれぞれの項目に対する効果の度合をまとめた。

なお、これらの効果による安全に関する質量特性の評価については、7章で他のアームと共にまとめて述べる。



## 第5章 3次元重力補償アームの開発

### 5.1 3次元重力補償アーム開発の目的

一般の施設環境，家庭環境等で作業を行うアームを設計する場合，自由度の多い多関節アームは障害物の回避や，対象物把持のための最適把持姿勢をとるために有効である．しかし，リンク数，関節数が増加するに伴い自重が増加し，アクチュエータの大型化を招き，特に根元側のアクチュエータの重量がさらに増加し，無駄なエネルギー消費も増えていくという悪循環が起きる．この問題を解決するための手法の一つとして，自重補償機構を設ける設計手法[5-1]，[5-2]，[5-3]等がある．

本研究では，軽量ながら実際の作業を行える出力，自由度，可動範囲を持つサービスロボット搭載用アームの開発を目的としている．全体構成としては6自由度のアームを想定しており，このうち3自由度のアーム部分の開発について，移動ロボット搭載用アームに適した自重補償機構を提案する．ただし自重補償機構を組み込むに当たって，機構が複雑になると，その分重量が増えてしまうため，できるだけ単純な機構で実現できる機構とする．本アームの目標仕様をまとめた表を Table 5.1 に示す．3章で述べた通り，顔接触許容平均速度は250mm/sとし，可搬質量は1kgとする．モータ出力（トルク）については，機構的な安全対策を考慮して，モータ関節配置型アームよりも低くなることを目標とし，可動範囲についてはモータ関節配置型アームと同程度の手先到達範囲とする．

Table 5.1 Design Spec of Gravity Compensation Arm

項目	仕様
顔接触許容速度	250 mm/s
可搬重量	1 kg
モータ出力(トルク)	13.1 Nm以下 (モータ関節配置型アームよりも低くする)
可動範囲	最大到達距離 640mm (モータ関節配置型アームと同程度)

アームの自重補償機構は大きく分けてカウンタウエイトを用いる方法と，ばね等を用いる方法がある．このうちカウンタウエイトを用いる方法は支持部にばねを接続することによるモーメントが発生せず，また，重心の変動が少ないので移動ロボット等に搭載するのに適しているが，カウンタウエイトの分，全体重量が増加してしまうという問題がある[5-4]，

[5-5]. しかし，カウンタウエイトとしてアクチュエータやバッテリーなどロボットに必要な部品を用いることで，無駄な全体重量の増加は防ぐことができる．そこで，移動ロボットに向いているカウンタウエイト方式で，カウンタウエイトとしてアクチュエータを用いることにより，全体重量の増加をできるだけ抑える構成とする．また従来，アームの2次元平面上での動作の自重補償を行う自重補償機構は多く提案されているが，3次元の自重補償を行う自重補償の提案は例えば[5-6]，[5-7]等あるが例は少なく，また3次元であっても複雑な機構となることが多い．そこで関節配置を工夫することにより，3次元の自重補償を行いつつもシンプルな機構となる構成とする．さらに，サービスロボットの場合，様々な重量の物体を持つことが考えられ，通常は想定される一番重い物体に合わせて関節駆動アクチュエータを選定しなければならず，軽量の物体を持つ機会も多いにもかかわらず，高出力のアクチュエータを用いなければならないことがある．このような場合に対応するために，手先負荷に応じて重量補償ができれば[5-8]，関節駆動アクチュエータを重い物体に合わせて選定しなくてもよい可能性がある．よって，手先負荷に応じて重力補償もできる構成とする．

以上，従来の重力補償アームの機構的な安全対策を考慮した場合の問題についてまとめると以下ようになる．

- ① 3次元の重力補償は例が少なく，機構も複雑である
- ② カウンタウエイトではその分全重量が増加する
- ③ カウンタウエイトの動作範囲にスペースが必要
- ④ 先の負荷に応じた自重補償ができない

そこで，本研究ではそれぞれの問題に対して以下の機構を提案する．

- ① シンプルな構成の3次元重力補償機構
- ② アクチュエータをカウンタウエイトとして利用できるカウンタバランス構成
- ③ 2段階の重力補償機構によるコンパクト化
- ④ 手先の負荷に応じた追加の重力補償

なお，それぞれの提案機構と機構的安全対策との関係を Table 5.2 に示す．

Table 5.2 Relationship between Mechanical Features and Safety Measure Items

	質量の低減	モータ低出力化	構造の小型化
① シンプルな構成の3次元重力補償機構		○	○
② アクチュエータをカウンタウエイトとして利用できる構成	○	○	
③ 2段階の重力補償機構によるコンパクト化			○
④ 手先の負荷に応じた追加の重力補償		○	

本章はまず 5.2 節で 3 次元重力補償機構の原理とこれを実現するための幾何学的関係を導出する。さらに、手先負荷が変わった場合の重力補償の原理についても説明する。5.3 節では、本重力補償機構を適用したアームの設計について述べる。リンクやカウンタウエイトであるアクチュエータ等の干渉を回避しつつ、広い可動範囲を得るための構造および、全体をコンパクトにするための、ワイヤによる追加の重力補償について説明する。5.4 節では、手先負荷が変わった場合の追加の補償力について、手先負荷に応じた最適な補償力をシミュレーションにより算出し、重力補償効果を確認する。5.5 節では、本アーム機構を応用した 6 自由度アームの設計について述べる。5.6 節では重力補償アームの仕様を 3 章のモータ関節配置型アームと比較して、その特性評価について述べる。

## 5.2 3次元重力補償機構

### 5.2.1 アーム自重補償機構の基本構成

本機構は平行リンク機構を用いたパンタグラフ型アーム機構をベースとしており、手先側と反対側に補償力を加えることにより、重力補償を行うことができる。補償力については、リンクに固定されたカウンタウエイト自重による力と、ワイヤにより付加する補償力の 2 つの補償力を組み合わせることによって、構造の小型化を図っている。ここではまず、リンクに固定されたカウンタウエイトについて解析を行う。

Fig.5.1 は本機構の概念を示す図と、これを Joint2, Joint3 の軸方向および Joint1 の軸方向から見た図である。まず根元の Joint1 を除いた Joint2, Joint3 について考える。なお、ここでは静的釣合で評価を行っていく。

今、Fig.5.1 に示すように座標系、リンク長、重心位置、重量および関節角度を設定する。Link1 とアタッチメントの質量の和を  $m_1$ 、Link2 とカウンタウエイト 1 の質量の和を  $m_2$ 、Link3 とカウンタウエイト 2 の質量の和を  $m_3$  とし、Joint2 から Joint4 までの距離を  $l_2$ 、Joint4 から Link1 の重心までの距離を  $l_1$ 、Joint2 の軸方向から見た時の Joint2 から  $m_2$  の重心までの距離を  $l_{m2}$ 、Joint1 の軸方向から見た時の Link2 から  $m_2$  の重心までの距離を  $l_{m2}'$ 、Joint3 の軸方向から見た時の Joint3 から  $m_3$  の重心までの距離を  $l_{m3}$ 、Joint1 の軸方向から見た時の Link3 から  $m_3$  の重心までの距離を  $l_{m3}'$ 、Link5 の長さを  $l_2'$  とする。なお、ここでは Link4, Link5 の質量は無視する。能動軸である Joint2, および Joint3 のアクチュエータで発生しなければならないトルク  $T_2, T_3$  は、それぞれの軸回りのトルクの釣合いを考慮して以下のように表せる。

$$T_2 = (m_1 l_2 - m_2 l_{m2}) g \sin \theta_2 \cos \theta_1 \quad (5-1)$$

$$T_3 = (-m_1 l_1 + m_3 l_{m3}) g \cos \theta_3 \cos \theta_1 \quad (5-2)$$

よって、 $T_2, T_3$  が  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  によらず 0 になるためには、式(5-3)、式(5-4)が成り立てばよい。

$$m_1 l_2 = m_2 l_{m2} \quad (5-3)$$

$$m_1 l_1 = m_3 l_{m3} \quad (5-4)$$

次に Joint1 軸回りのトルクの釣合いを考える。Fig.5.1 より，Joint1 のアクチュエータで発生しなければならないトルクを  $T_1$  とすると，式(5-5)が成り立つ。

$$T_1 = ((l_2 \cos \theta_2 + l_1 \sin \theta_3) \sin \theta_1 + l_2' \cos \theta_1) m_2 g - (l_{m2} \cos \theta_2 \sin \theta_1 + (l_{m2}' - l_2') \cos \theta_1) m_2 g - (l_{m3} \sin \theta_3 \sin \theta_1 + (l_{m3}' - l_2') \cos \theta_1) m_3 g \quad (5-5)$$

これを整理して，

$$T_1 = (m_1 l_2' - m_2 l_{m2}' + m_2 l_2' - m_3 l_{m3}' + m_3 l_2') g \cos \theta_1 + ((m_1 l_2 - m_2 l_{m2}) \cos \theta_2 + (m_1 l_1 - m_3 l_{m3}) \sin \theta_3) g \sin \theta_1 \quad (5-6)$$

よって， $T_1$  が  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  によらず 0 になるためには，式(5-3)，式(5-4)および次式(5-7)が成り立てばよい。

$$m_1 l_2' = (l_{m2}' - l_2') m_2 + (l_{m3}' - l_2') m_3 \quad (5-7)$$

以上より，式(5-3)，式(5-4)，式(5-7)を満たすようにアームを設計すれば，理論上は Joint1, Joint2, Joint3 のいずれの軸に対してどんな姿勢をとった場合でもアクチュエータで発生しなければならないトルクを 0 とすることができるため，自重補償が実現できる。例えば，それぞれのパラメータの関係式が(5-8)であった場合，式(5-9)，(5-10)の関係を満たせばよい。

$$l_1 = l_2, \quad m_2 = m_3, \quad l_{m2}' = l_{m3}' \quad (5-8)$$

$$l_{m2} = l_{m3} = \frac{m_1}{m_2} l_2 \quad (5-9)$$

$$l_{m2}' = l_{m3}' = \left(1 + \frac{m_1}{2m_2}\right) l_2' \quad (5-10)$$

また，本機構ではパンタグラフ機構を用いており，Fig.5.1 のカウンタウエイトの位置にアクチュエータを配置し，ベルト等で Joint2 および Joint3 に動力を伝達することで，カウンタウエイトとして，それぞれの軸を駆動するアクチュエータを利用することができる。

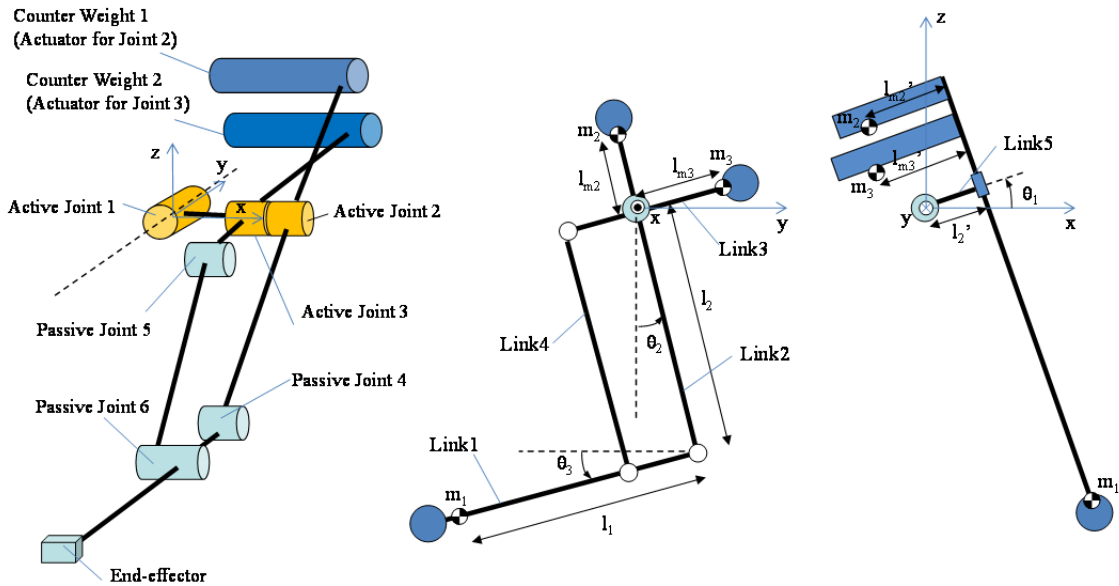


Fig. 5.1 Modeling of the weight compensation

なお、最近では扁平型のモータも出ているが、本機構では Joint1 回りの重心バランスをとるためにどちらかという全長の長いモータを用いるのが適している。従来の自重補償機構では、カウンタウエイトが必要で重量増を招いていたが、関節を駆動するアクチュエータをそのままカウンタウエイトとして利用できるため、アーム全体重量の増加を抑えることができる。

以上、アクチュエータをカウンタウエイトとして利用できる構成により、アームの質量の低減とモータの低出力化を実現している。

### 5.2.2 ワイヤを用いた追加重力補償機構の構成

前節で述べたようなリンクのパラメータを実現しようとする、例えば、リンク長が長い場合や、手先のアタッチメントやエンドエフェクタが重い場合、カウンタウエイトを重くするか、カウンタウエイト側のリンク長を長くしなければならない。しかし、カウンタウエイトとするアクチュエータの重量は出力によって範囲が限定されており、また、カウンタウエイト側のリンク長を長くするのは、アーム全体が大きくなり、コンパクトなアームとすることができない。そこで、カウンタウエイト側のリンク長を抑えつつ、回転軸回りの釣り合いを満たすため、補償力を付加することを考える。今、Fig.5.2 のようにカウンタウエイト 1, 2 付近にそれぞれ鉛直下向きの補償力  $F_2, F_3$  を加えることで、アーム全体をコンパクトにできる。特に、Fig.5.3 のように補償力を重心位置に付加し、前節の式(5-3), (5-4), (5-7)を満たすように  $m_2, m_3$  を補償することにより、 $m_2, m_3$  が小さい場合でも、一定の補償力  $F_2, F_3$  によって、理論上はアームがどんな姿勢をとってもアクチュエータで発生しなければならないトルクを 0 とすることができる。

実際の補償力の付加方法についてはワイヤなどを介して、カウンタウエイトを用いる方法、ばねなどの弾性体を用いる方法、アクチュエータなどにより能動的に補償力を付加する方法などが考えられる。このうち、アクチュエータなどにより能動的に補償力を付加する方法では、補償力を把持対象物の重さに応じて制御することによって、従来は困難であったアームの自重のみならず把持対象物を把持した状態でのアーム全体の重力補償が行える。特に、式(5-8), (5-9), (5-10)を満たすようにアームを設計した場合、 $m_2 = m_3$  が成り立ち、 $m_2, m_3$  に相当する補償力は同じでよいことになるため、アクチュエータ 1 つで力を分岐させて使用できる。このように補償力を利用することによって、アームをよりコンパクトにでき、かつ、把持対象物の重量に応じた重力補償も実現できる。

以上、2段階の重力補償機構によるコンパクト化により、アームの構造の小型化を実現し、さらに手先の負荷に応じた追加の重力補償により、アーム関節モータの低出力化を実現している。

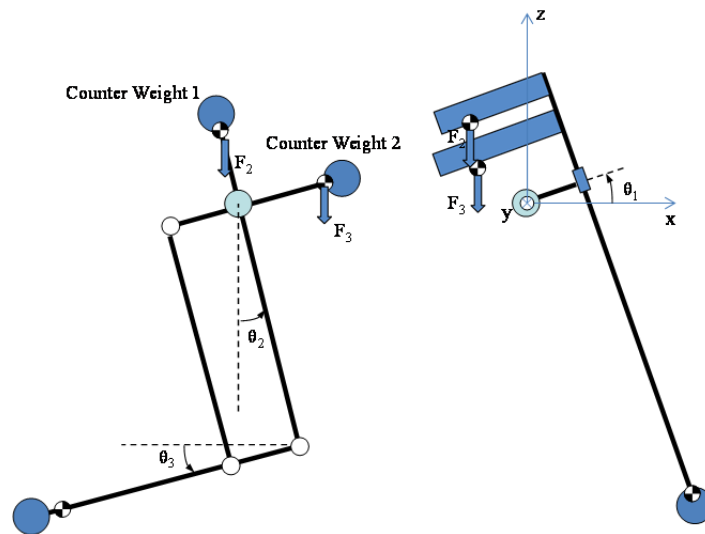


Fig. 5.2 Modeling of the gravity compensation mechanism

## 5.3 3次元重力補償機構のアーム設計への適用

### 5.3.1 重力補償アームの設計

本章では、3次元重力補償機構のアーム設計への適用について述べる。Fig.5.3 に実際の構造を示す。先述の機構を実現するため、パンタグラフ機構の端に Joint2, Joint3 駆動モータを取り付けて、そこからタイミングベルトで Joint2, Joint3 の駆動軸に動力を伝達する。また、アームおよびパンタグラフ駆動モータの動く範囲を避けるために、Joint1 の駆動モータは駆動軸から離して配置し、タイミングベルトで動力を伝達する。また、追加の重力補償のために、ワイヤを Joint2, Joint3 駆動モータ近傍に取り付け、ワイヤはベースに配置したプーリを介して伝達、連結され、他端を補償力発生源に接続される。Fig.5.4 は、ベース側の補償力発生源の構造を示した図である。アームに接続された2本のワイヤは可動式の Pulley1 で1本のワイヤに動力を統合され、Pulley2 を介してカウンタウエイトに接続される。このカウンタウエイトは、前節で述べたようにアームに取り付けられたモータ質量のみではアーム重力補償のために足りない補償力を補うためのものである。さらに、補償力発生源として、補償力調整用モータを Pulley2 とカウンタウエイトの間に配置できる構造とし、手先の負荷に応じてモータトルクを制御し、補償力を調整することも可能である。つまりアーム自重はモータ重量と追加のカウンタウエイトで重力補償を行い、さらに手先負荷がかかった場合は、モータトルクを制御して補償力を追加する。Fig.5.5 に製作したアームの写真、Table5.3 に仕様（補償力調整用モータなしの場合）を示す。アームのリンク長（リンク1, リンク2）は約 25 cm, 使用したモータは Maxon 社製の 25W と 40W モータで、人の傍で動くアーム用に低出力のアクチュエータとした。

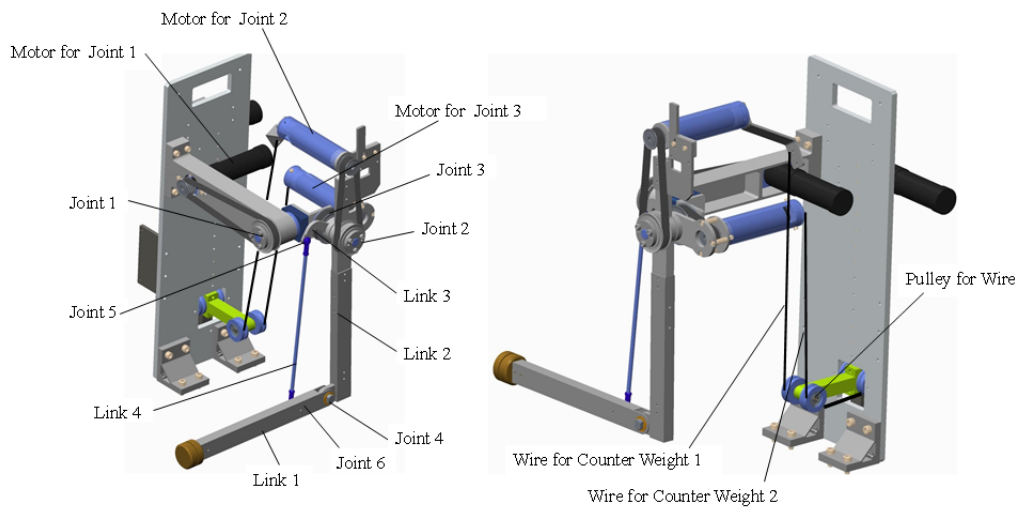


Fig. 5.3 The design of the arm equipped with a gravity compensation mechanism

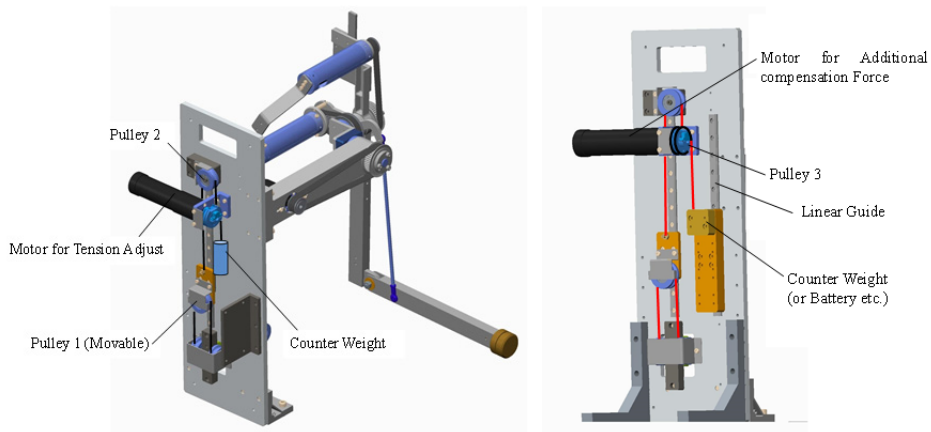


Fig. 5.4 The arm equipped with a gravity compensation mechanism

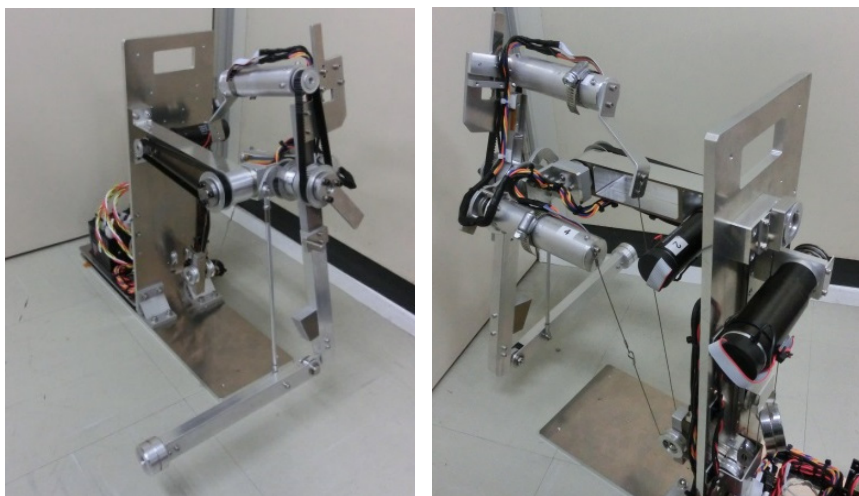


Fig. 5.5 The arm equipped with a gravity compensation mechanism

Table 5.3 Specification of the arm

Arm Length [mm]	L1=250, L2=247
Range of Motion [deg]	$0 \leq \theta_1 \leq 80$
	$-90 \leq \theta_2 \leq 40 \quad ((\theta_2 - \theta_3) \geq -70)$
	$-60 \leq \theta_3 \leq 90 \quad ((\theta_2 - \theta_3) \geq -70)$
Actuator	Joint1: Maxon EC22 (40W)
	Joint2 : Maxon ECmax22 (25W)
	Joint3 : Maxon ECmax22 (25W)
Payload[kg]	1.0
Weight [kg]	2.5(Total), 1.2(Movable Part)

なお、補償力は Fig.5.2 のように、常に鉛直下向きで付加するのが理想であるが、実際の移動ロボット搭載型アーム機構設計においては、空間の制限や機構干渉を回避する形状としており、ワイヤで補償力を加えているため姿勢によって補償力の向きが変化するので、完全な自重補償とはならない。そこで、設計した機構のワイヤを用いた自重補償力と各関節のモータトルクの関係を出して、設計した機構のモータトルク軽減効果を評価する。Fig.5.7 にワイヤの幾何関係を示す。ワイヤ張力が作用する点の位置ベクトルをそれぞれ  $\mathbf{r}_2$ ,  $\mathbf{r}_3$ , ワイヤの張力ベクトルをそれぞれ  $\mathbf{C}_2$ ,  $\mathbf{C}_3$  とし、Joint1, Joint2, Joint3 の軸方向の単位ベクトルを  $\mathbf{u}_1$ ,  $\mathbf{u}_2$ ,  $\mathbf{u}_3$  とすると、Joint1, Joint2, Joint3 回りのワイヤによる補償トルク  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  は外積によるモーメントの算出よりそれぞれ以下の式で表される。

$$\tau_1 = (\mathbf{r}_2 \times \mathbf{C}_2) \cdot \mathbf{u}_1 + (\mathbf{r}_3 \times \mathbf{C}_3) \cdot \mathbf{u}_1 \quad (5-11)$$

$$\tau_2 = (\mathbf{r}_2 \times \mathbf{C}_2) \cdot \mathbf{u}_2 \quad (5-12)$$

$$\tau_3 = (\mathbf{r}_3 \times \mathbf{C}_3) \cdot \mathbf{u}_3 \quad (5-13)$$

ここで、Fig.5.6 に示す幾何関係より、 $\mathbf{R}_y(\theta)$  を y 軸回りの回転行列とすると、式 (5-11), (5-12), (5-13) の各ベクトルは以下のように表せる。

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{R}_y(\theta_1) \begin{pmatrix} l_2' - l_{f2}' \\ -l_{f2}' \sin \theta_2 \\ l_{f2}' \cos \theta_2 \end{pmatrix}^T \quad (5-14)$$

$$\mathbf{r}_3 = \mathbf{R}_y(\theta_1) \begin{pmatrix} l_2' - l_{f3}' \\ -l_{f3}' \sin \theta_3 \\ l_{f3}' \cos \theta_3 \end{pmatrix}^T \quad (5-15)$$

$$\mathbf{C}_2 = F_2 \begin{pmatrix} -s_1 \\ s_2 \\ -h \end{pmatrix}^T - \mathbf{r}_2 \quad (5-16)$$

$$\mathbf{C}_3 = F_3 \begin{pmatrix} -s_1 \\ s_3 \\ -h \end{pmatrix}^T - \mathbf{r}_3 \quad (5-17)$$

$$\mathbf{u}_1 = (0, 1, 0)^T \quad (5-18)$$

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}_3 = (\cos \theta_1, 0, \sin \theta_1)^T \quad (5-19)$$

以上の式をもとに、重力補償のための最適な補償力を検討する。まずは、できるだけシステムをシンプルにするため、一定力で重力補償をすることを考える。式 (5-1), (5-2), (5-5) の補償力なしで各関節に必要なトルクから、式 (5-11), (5-12), (5-13) のワイヤによる補償力をそれぞれ引けば、実際に各関節で必要なトルクが求まる。ここで、各関節角度がそ



れぞれ  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  deg の時の各軸駆動モータで必要なトルクの和を  $T_{all}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  とし、評価値  $V$  として可動範囲内で各関節を 10 deg 刻みで駆動した時の各駆動モータのトルク総和 (式(5-20)) を設定する.

$$V = \sum_{i=-1}^8 \sum_{j=-9}^4 \sum_{k=-6}^6 T_{all}(10i, 10j, 10k) \quad (5-20)$$

Fig.5.7 に補償力 ( $F_2+F_3$ ) と評価値  $V$  の関係 (実線) を示す. ここで, 各パラメータは設計値をもとに以下の値とする.

$$m_1 = 0.309\text{kg}, \quad m_2 = 0.495\text{kg}, \quad m_3 = 0.351\text{kg}, \quad l_1 = 211\text{mm}, \quad l_2 = 247\text{mm}, \quad l_2' = 60\text{mm},$$

$$l_{m2} = 36.5\text{mm}, \quad l_{m3} = 45\text{mm}, \quad l_{m2}' = 94.5\text{mm}, \quad l_{m3}' = 75.3\text{mm}, \quad l_{f2} = 50\text{mm}, \quad l_{f3} = 50\text{mm},$$

$$l_{f2}' = 50\text{mm}, \quad l_{f3}' = 50\text{mm}, \quad s_1 = 85\text{mm}, \quad s_2 = 4\text{mm}, \quad s_3 = 36\text{mm}, \quad h = 244\text{mm}$$

この結果より, 本機構ではアーム自重に対して, 6 N 程度の補償力で評価値が最少になることがわかった. さらに, 実機による実験を行った実験結果を Fig.5.7 のプロットで示す. 実験結果は, 追加のカウンタウエイトを補償力が 2 N, 6N, 10 N となるように構成し, アームを動作させてモータ電流によりトルクを算出して和をとったものである. このように, 6 N 程度で実際にモータトルク総和が低くできることが確認できた. よって, この補償力を追加のカウンタウエイトで付加する. なお, このカウンタウエイトをロボットのバッテリー等にすれば, ロボット全体の重量増は抑えることができる.

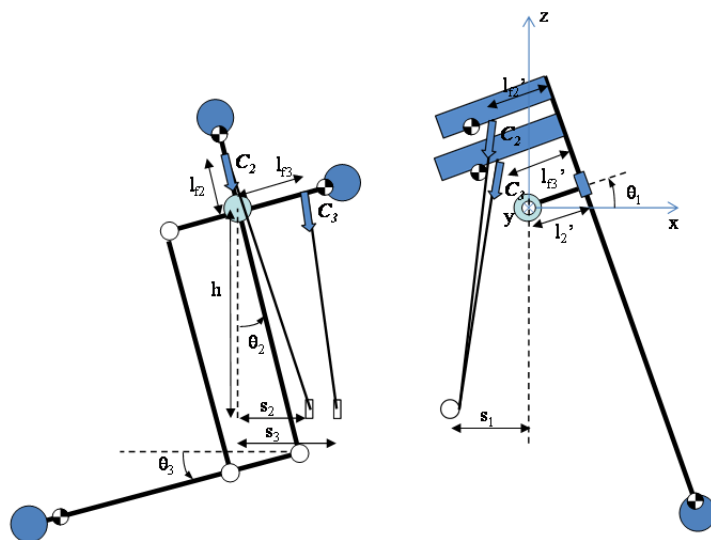


Fig. 5.6 Gravity compensation using a wire pulley and the most suitable compensation force

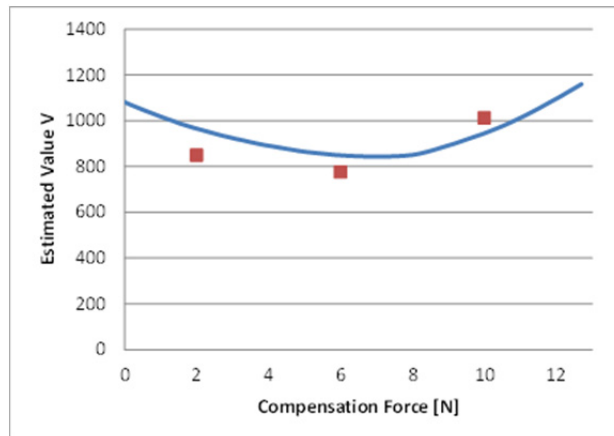


Fig. 5.7 Gravity compensation using a wire pulley and the most suitable compensation force

### 5.3.2 重力補償アームの評価

ここでは、本自重補償機構のモータトルク軽減効果の評価を行う。Fig.5.8 は各関節軸を単独で駆動した時のそれぞれの各関節トルク  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  およびそれらのトルク総和  $T_a$  のシミュレーション結果を示している。(a)は  $\theta_2 = 0 \text{ deg}$ ,  $\theta_3 = 0 \text{ deg}$  で一定とし  $\theta_1$  を駆動した場合, (b)は  $\theta_1 = 0 \text{ deg}$ ,  $\theta_3 = 0 \text{ deg}$  で一定とし  $\theta_2$  を駆動した場合, (c)は  $\theta_1 = 0 \text{ deg}$ ,  $\theta_2 = 0 \text{ deg}$  で一定とし  $\theta_3$  を駆動した場合を示している。関節トルクは前節と同様に式(5-1), (5-2), (5-5) の補償力なしで各関節に必要なトルクから, 式(5-11), (5-12), (5-13)のワイヤによる補償力をそれぞれ引いて算出する。追加の補償力については, カウンタウエイトのみとし, 追加の補償力としてモータは用いていない。また, 比較のため自重補償機構がなく, 同じ関節配置で各関節にモータを配置した従来の多関節アームで同出力モータを用い, 同寸法のもので同じ動作を行ったとした場合のトルク総和  $T_b$  のシミュレーション結果も示している。まず, 重力補償がある場合( $T_a$ )とない場合( $T_b$ )でトルク総和を比較すると, ある場合のほうがトルク総和は 75%から 85%程度軽減されており, 重力補償機構の効果が確認できる。

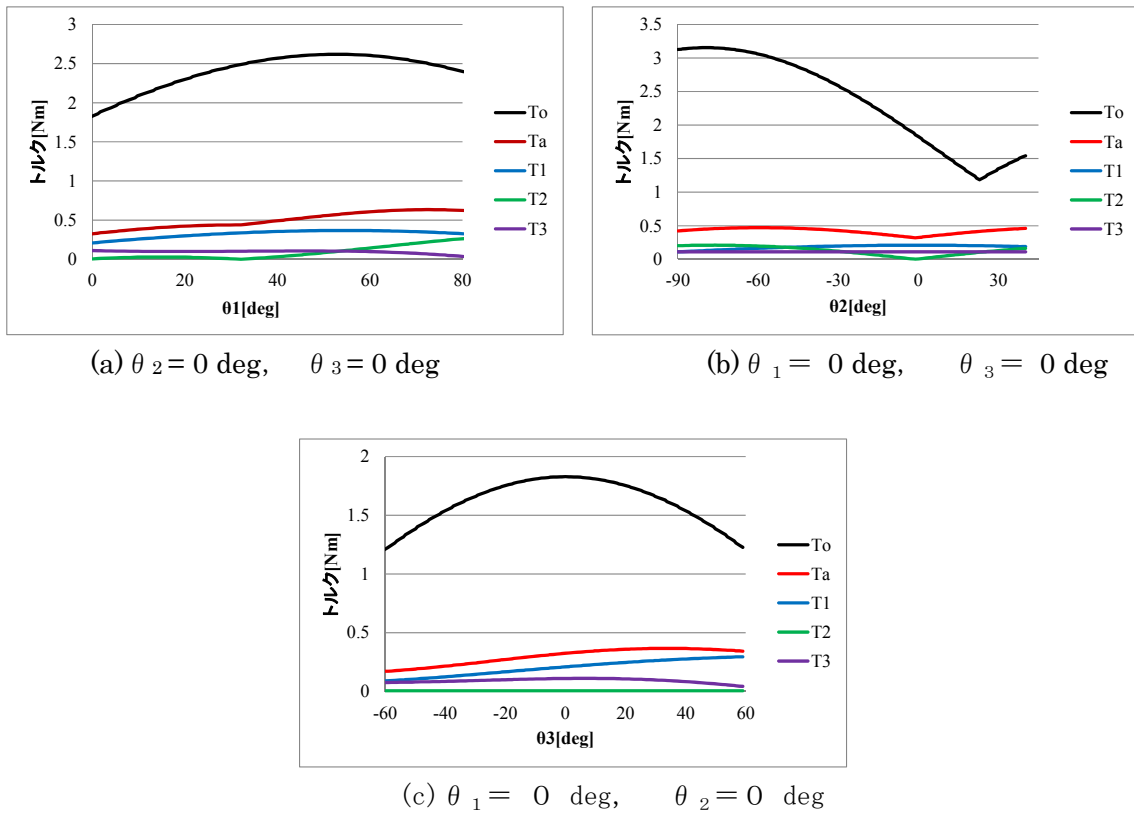


Fig. 5.8 The effect of the gravity compensation of the torque total of each joint to the arm posture

次に、Fig.5.9に重力補償機構がある場合で、各関節軸を単独で駆動した時のそれぞれの各関節トルクおよびトルク総和のシミュレーション結果（実践）と実験結果（プロット）を表示したものを示す。シミュレーション結果に対して、実験結果はほぼ同程度の値および傾向を示しており、自重補償機構の効果およびシミュレーション方法、結果の妥当性が確認できた。

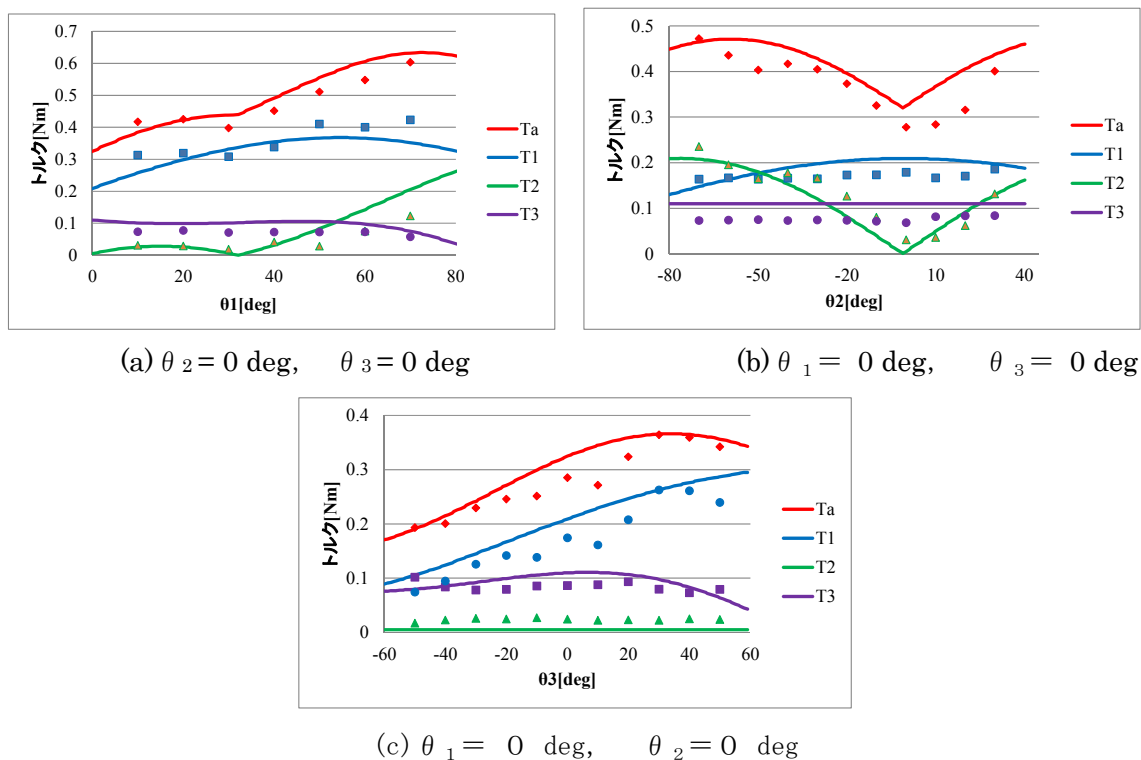


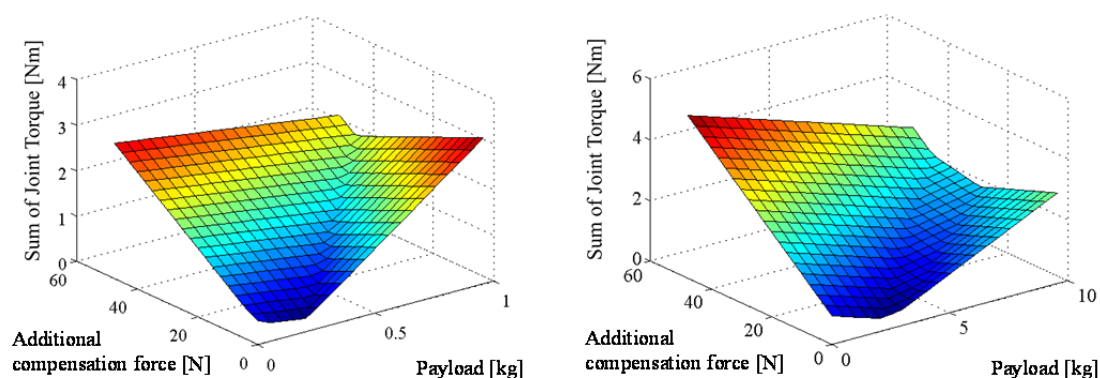
Fig. 5.9 Simulation result and experimental result of the torque total of each joint to the arm posture

## 5.4 手先負荷に応じた補償力補償

次に、把持対象物を持った時等、手先負荷が変化した場合の重力補償を検討する。補償力発生モータでワイヤを引張ることにより、自重補償のためのカウンタウエイトに追加して、ワイヤに接続されたアーム部材に補償力を付加することができる。よって、アームが把持対象物を持った時等、手先負荷が変わった場合でもそれに応じて補償力を制御することができる。これにより、関節駆動モータのトルクを抑えることができ、関節駆動モータを出力を上げるために大型化する必要がない。ここで、関節駆動モータのトルク軽減効果を示すため、手先負荷と補償力に対する関節トルク総和の関係を前章と同様のシミュレーションにより求めた結果を Fig.5.10 に示す。なお、アーム姿勢としてここでは例として、(a)  $\theta_1 = 0 \text{ deg}, \theta_2 = 0 \text{ deg}, \theta_3 = 0 \text{ deg}$ , (b)  $\theta_1 = 30 \text{ deg}, \theta_2 = 45 \text{ deg}, \theta_3 = 0 \text{ deg}$  の場合を取り上げている。この結果より、手先負荷が増えるにつれて補償力も増やせば、トルク総和を減らすことができることがわかる。ただし、補償力を増やしすぎると逆に関節駆動モータの負荷となりトルク総和が大きくなる。また、アームの姿勢によって補償力も変化することがわかる。よって、手先負荷に応じて最適な補償力が存在し、手先負荷とアーム姿勢に応じて補償力を制御することによって、各関節駆動モータのトルクを抑えることができることがわかる。なお、手先負荷の検出については、モータトルクからの

推定, 手先に6軸力センサを取り付ける等の方法が考えられる.

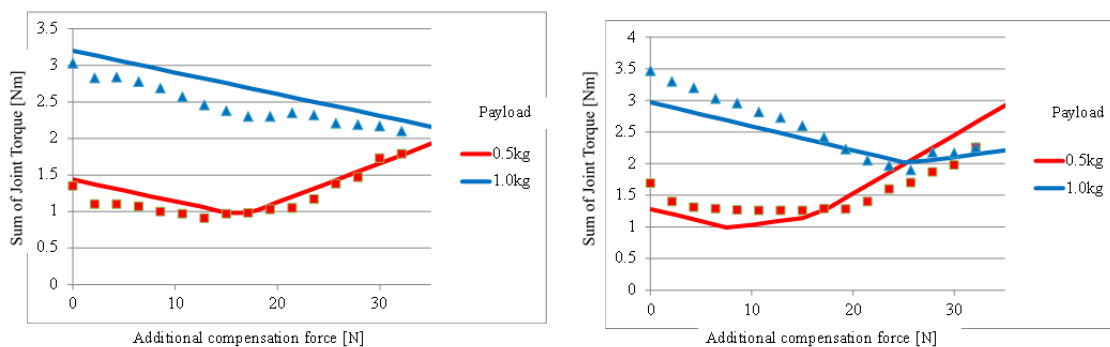
次に, Fig.5.11 にシミュレーション結果(実線)と実験結果(プロット)を示す. 実験ではそれぞれのアーム姿勢において, 0.5kgと1.0kgの2種類のおもりを手先に取り付け, 追加の補償力を変えた時の各関節モータトルク総和を測定してプロットした. なお, 実験に用いた本機構では補償力発生モータは第1軸と同じ40Wのものを用いている. このように, シミュレーション結果と実験結果の値と傾向はほぼ一致しており, 補償力の効果とシミュレーションの妥当性が確認できた.



(a)  $\theta_1 = 0 \text{ deg}, \theta_2 = 0 \text{ deg}, \theta_3 = 0 \text{ deg}$

(b)  $\theta_1 = 30 \text{ deg}, \theta_2 = 45 \text{ deg}, \theta_3 = 0 \text{ deg}$

Fig.5.10 The relationship between payload and additional compensation force and total torque of joint



(a)  $\theta_1 = 0 \text{ deg}, \theta_2 = 0 \text{ deg}, \theta_3 = 0 \text{ deg}$

(b)  $\theta_1 = 30 \text{ deg}, \theta_2 = 45 \text{ deg}, \theta_3 = 0 \text{ deg}$

Fig.5.11 Simulation result and experimental result of the total torque on the additional compensation force

## 5.5 6自由度アームへの拡張

Fig.5.12 に本アーム機構を利用した6自由度アームの設計例を示す。アームの根元に水平回転軸として第0軸を配置し、第4軸と第5軸を本機構の手先に手首自由度として追加した。第0軸を水平回転軸とすることにより、アクチュエータはアーム重量を支えるトルクを出力しなくてもよい。また、第4軸のアクチュエータは、第2軸のアクチュエータ付近に配置しそこからタイミングベルトプーリで手首まで動力を伝達する。これにより、アーム手先の質量増加を抑えることができ、さらにアクチュエータをカウンタウエイトとして利用できる。第5軸は必要トルクが小さいため、小型のアクチュエータを手先に配置する。Table 5.4 にこのアームの仕様を示す。このように、本重力補償機構を応用して、軽量な6自由度のアームを構成できる。

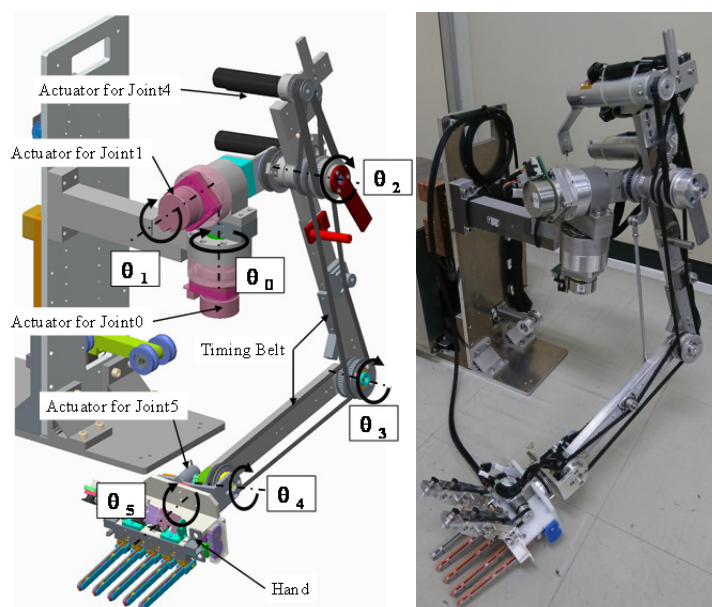


Fig.5.12 A design of the 6 degree of freedom arm equipped with gravity compensation mechanism

Table 5.4 Specification of the 6DOF arm

Arm Length [mm]	L1=250, L2=247
Range of Motion [deg]	$-45 < \theta_0 < 60$
	$0 < \theta_1 < 80$
	$-90 < \theta_2 < 40$ ( $(\theta_2 - \theta_3) \geq -70$ )
	$-60 < \theta_3 < 90$ ( $(\theta_2 - \theta_3) \geq -70$ )
	$-45 < \theta_4 < 90$
Actuator	$-110 < \theta_5 < 110$
	Joint0: Maxon EC45 flat (70W)
	Joint1: Maxon EC45 flat (70W)
	Joint2: Maxon ECmax22 (25W)
	Joint3: Maxon ECmax22 (25W)
Payload [kg]	Joint4: Maxon ECmax22 (25W)
	Joint5: Maxon RE16 (4.5W)
Weight [kg]	1.0
	3.5 (Total), 2.0 (Movable Part)

## 5.6 3次元重力補償アームの安全に関する特性評価

今回試作した重力補償アームと、3章で述べた各関節にアクチュエータを配置したアームの仕様の比較結果を Table 5.5 に示す。また、本アームの機構的特徴と、機構的安全対策との関係および評価を示す表を Table 5.6 に示す。まず、質量に関する項目については、3章のモータ関節配置型アームと比較して、ほぼ同じサイズながら、重力補償アームの可動部は質量を-60%とすることができている。また、アームの自重が軽くなった分、ほぼ同じ出力のモータを使っているながら、アーム可搬重量はモータ関節配置型アームの2倍となった。次に、出力に関する項目については、静止時の最大関節トルク総和（アーム水平に真っ直ぐ伸ばした状態）で比較する。この結果より、関節トルク総和を-90%にできていることがわかる。さらに、重力補償アームで最大可搬重量 1.0kg を持った時の関節トルク総和は、モータ関節配置型アームで何も持っていない状態よりも関節トルク総和が低くできていることがわかる。次に構造の小型化に関する項目については、アームの平均断面積を-40%することができている。

本アームの提案機構のそれぞれの効果については、①シンプルな構成の3次元重力補償機構が全体のモータ低出力化、構造の小型化に貢献しており、②アクチュエータをカウンタウエイトとして利用できる構成によりモータ自重分の質量軽減および、モータ自重分のトルク軽減を達成している。また、③2段階の重力補償機構によるコンパクト化はカウンタウエイト側のリンク長減により、構造の小型化に貢献している。④手先の負荷に応じた追加の重力補償については、手先負荷に応じてモータを高出力化しなくてよいことから、モータ低出力化に貢献している。

なお、これらの効果による質量特性を基にした接触許容速度の評価については、7章で他のアームとまとめて行う。

Table 5.5 Gravity compensation type vs actuator mounted type

	モータ関節配置アーム	重力補償アーム
可搬重量	0.5 kg	1.0 kg
全質量	4.0 kg	3.4 kg
可動部質量 (グリッパ除く)	3.0 kg	1.1 kg
必要モータ出力 (アーム自重のみの 最大静止トルク総和)	10.8 Nm	1.1 Nm
必要モータ出力 (最大可搬重量時の 最大静止トルク総和)	13.1 Nm	5.6 Nm
最大到達距離	640mm	660mm
アーム上腕部分径	φ70 mm	30×60mm
アーム前腕部分径	φ60 mm	30×30mm

Table 5.6 Relationship between Proposed Mechanism and Mechanical Safety Measure

	質量の低減	モータ低出力化	構造の小型化
重力補償アーム全体	可動部質量 -60%	必要トルク -90%	アーム断面積平均-40%
①シンプルな構成の3次元重力補償機構		◎ 必要トルク -90%	◎ アーム断面積平均-40%
②アクチュエータをカウンタウエイトとして利用できる構成	○ モータ自重分の質量軽減	○ モータ自重分のトルク軽減	
③2段階の重力補償機構によるコンパクト化			◎ カウンタウエイト側のリンク長減
④手先の負荷に応じた追加の重力補償		○ 手先負荷に応じて関節モータを大きくしなくてもよい	

## 5.7 3次元重力補償アームのまとめ

本章では、人間共存ロボットに用いるための、3次元重力補償機構の原理、これを用いたの軽量安全アーム設計試作、評価について述べた。本重力補償機構はパンタグラフ機構を用い、カウンタウエイトとして関節駆動アクチュエータを用いることで、全体の質量を小さくできる。さらに、パンタグラフ機構全体を根元で回転させ、モーメントを釣り合わせるようにカウンタウエイトを配置することで、3次元の重力補償を実現できる。これを実現するためのリンク長や重心位置等の関係を導出した。また、この機構をアーム設計にそのまま適用すると、カウンタウエイトの駆動領域が大きくなりすぎるため、ワイヤを用いて補償力を付加する機構を構成することによって、アーム全体をできるだけコンパクトになるようにした。

設計製作したアームの関節トルクシミュレーションから、従来の重力補償なしのアームに対して15%から25%の関節トルクでアームを構成できることを確認した。また、関節トルク計測実験を行い、シミュレーション結果とほぼ同程度の値および傾向を示しており、自重補償機構の効果およびシミュレーション方法、結果の妥当性が確認できた。さらに、補償力調整機構により、手先負荷に応じた補償力制御を行うことによって、各関節に必要なトルクを減らし、関節駆動モータの小型化が実現できることが分かった。またこの3自由度アーム機構を応用した6自由度アーム機構の設計について述べた。さらに、3章で述べたモータ関節配置型アームと比較し、質量の低減、モータ低出力化、構造の小型化について効果を確認し、提案機構のそれぞれの項目に対する効果の度合をまとめた。

なお、これらの効果による安全に関する質量特性の評価については、7章で他のアームと共にまとめて述べる。



## 第6章 下面支持ハンド搭載アームの開発

### 6.1 下面支持ハンド搭載アーム開発の目的

本章では、人ロボット協働タスクの具体例として配膳片付け作業を検討しアームシステムを提案する。なぜなら、人間共存空間での多様な物体のハンドリングが必要で、機能性と安全性を両立しなければならず、新しい機構システムによる貢献が期待できるからである。このような配膳片付け作業での多様な物体のハンドリングをターゲットとしたロボットアーム（例えば、Fig.6.1の写真に示すような宴会場等において、図右の概念図のような、配膳片付けを行う作業ロボット用のアーム）開発について述べる。食器類の配膳、片付け作業に要求される課題として、多様な食器類を扱うハンドリング方法の開発（例えば、人間はFig.6.2に示すように各食器類に応じた多様な把持方法をとる）、および作業空間での人との共存時の安全性対策が挙げられる。従来、様々な形状の物体をハンドリングするために、様々な多指ハンドが開発されてきた[6-1]～[6-7]。これらハンドの多くは、人間の手をモデルとし、人の器用さを目指した開発が行われてきた。しかし、複雑な機構、制御、センシングを必要とするため、様々な形状の物体を実用的にハンドリングするには至っていない。また、人間が傍に存在する空間での使用を考えた場合、ハンドが複雑な機構で大きく重くなると、それ自体も人との接触等での危険性が増す。さらにそれを支えるアームやロボット本体も出力の大きいモータを用いなければならないため、人間共存環境での作業では接触の危険性がさらに増してしまうという問題が生じる。そこで、できるだけ単純な機構、制御で、様々な種類の食器を安定してハンドリングする把持方法として、食器類を下から支える戦略に注目した。この方法では、食器類の下に板状の、ハンドの一部をすべり込ませて、物体把持に必要な力の大部分を占める重力方向の力を支えることにより、食器類の形状に依らない、安定したハンドリングを行うことができる。本章では、人間共存環境下で食器類ハンドリングをターゲットとした、食器類を下から支えるハンド機構である、下面支持ハンド(Under Supporting Extension Hand:以下USEハンドと呼ぶ)の開発について述べる。

本アームの目標仕様をまとめた表をTable 6.1に示す。3章で述べた通り、顔接触許容平均速度は250mm/sとし、可搬質量は1kgとする。モータ出力（トルク）については、機構的な安全対策を考慮して、モータ関節配置型アームよりも低くなることを目標とし、可動範囲についてはモータ関節配置型アームと同程度の手先到達範囲とする。

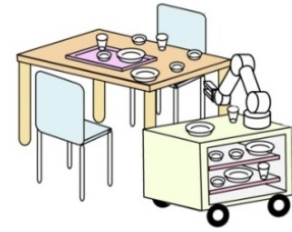


Fig.6.1 A scene and image of service robot for tableware handling



Fig.6.2 Various tableware handling

Table 5.1 Design Spec of Under Supporting Extension Hand

項目	仕様
顔接触許容速度	150mm/s (モータ関節配置型アームと同程度にする)
可搬重量	1 kg
モータ出力(トルク)	13.1 Nm以下 (モータ関節配置型アームよりも低くする)
可動範囲	最大到達距離 640mm (モータ関節配置型アームと同程度)

また、従来の多様な文体をハンドリングするアームの機構的な安全対策を考慮した場合の問題についてまとめると以下のようなになる。

- ①把持力の増大によるアクチュエータ出力増
- ②双腕化による重量増
- ③多自由度のハンドを支えるアーム出力増

そこで、本研究ではそれぞれの問題に対して以下の機構を提案する。

- ①下面支持ハンド
- ②アームの途中からリンクを分岐する構造
- ③干渉駆動機構

なお、それぞれの提案機構と機構的安全対策との関係を Table 6.2 に示す。

Table 6.2 Relationship between Mechanical Features and Safety Measure Items

	質量の低減	モータ低出力化	構造の小型化
①下面支持ハンド	○	○	
②アームの途中からリンクを分岐する構造	○		○
③干渉駆動機構		○	

本節では、食器ハンドリング作業の定義と、それに伴う課題と解決方法として、新しいハンド機構の提案を行い、6.2節では、食器ハンドリングアームシステムの設計試作について述べる。6.3節では、提案するハンド機構の把持安定性を解析する。6.4節では、アームの干渉駆動機構の制御、および総トルク低減効果について述べ、システムの有効性を示す。6.5節では、食器ハンドリング実験結果、およびその考察について述べる。6.6節では下面支持ハンド搭載アームの仕様を3章のモータ関節配置型アーム等と比較して、その特性評価について述べる。

## 6.2 食器類把持のための下面支持ハンド機構

本研究でターゲットとする、食器類の配膳、片付けにおいては、様々な形状の食器をテーブルに置く、あるいはテーブルから片付けるという作業を行わなければならない。そこで、実際に使われるシーンを想定して、食器類を分類し、以下の4種類の食器を扱えるハンド、およびロボットシステムの開発を目指すこととした。

- ①平らな板状の食器（皿類、トレイ等）
- ②椀形状食器（お椀、丼等、上部縁を持つもの）
- ③円筒状の食器（コップ、ビン等、水平方向から挟んで持つもの）
- ④その他の小物（箸、カトラリー等）

これらの形状的特徴に加えて、食器ハンドリングで要求される特徴として、以下の項目が挙げられる。

- ・形状、サイズの多様性
- ・材質、表面状態（ザラつき、濡れた状態等）の多様性
- ・料理や食残し等をこぼさない安定したハンドリング

これらの特徴に対応した把持戦略を考えた場合、例えば皿の把持において、ハンドで皿の端を大きな力で摘んで把持を行ったり、皿の両端を挟むようにして持つ方法が考えられる。しかし、端を持つ場合は、皿が大きくなるとハンドに必要な力が大きくなり、皿の両端を挟む場合においても、大きいハンドや場合によっては双腕ロボットが必要となる。この対策として、皿など平らな形状の食器の把持において、人間が行う側面把持に着目し、把持対象物の形状を皿に絞ることで、確実に把持を行えるシンプルなフック構造ハンドが提案されている[6-8]。また、薄板を用いた爪を食器の下にもぐりこませるハンドリング手法も提案されている[6-9]。この方法で、食器の反対側から力を加えて固定した状態で、爪状の機構をもぐりこませるため、大きな食器を把持する場合において、その分大きなハンド機構や双腕が必要となる。他にも爪を微小振動させることによって、片側からのアプローチで隙間に爪を挿入する手法も提案されているが[6-10]、挿入抵抗を完全になくすことはできない。そこで本研究では、様々なサイズ、形状の食器類に対しても可能な限り一方向からのアプローチで安定して把持することのできるコンパクトな機構を開発する。

提案するハンド機構の概念図を Fig.6.3(a)に示す。本機構は、単純な開閉式グリッパ、および把持対象物の自重を支えるための板状の部材から構成され、板状部材はアクチュエータで姿勢や位置を変えることができる。この機構を用いた手順は以下になる。まずグリッパにより皿を少し持ち上げる Fig.6.3(b)。この状態で板を皿の下に滑り込ませる Fig.6.3(c)。そしてグリッパによって、板の方向に皿を少し押し付ける力を加えることにより、皿の水平状態での安定把持が可能となる。ただし、完全な箱状の直方体はこの方法で持つことはできないが、通常、皿やトレイの端には、グリッパで摘める程度の部位が存在する。

本機構によれば、物体を把持し、かつ下から支えるという双腕的特長を有しつつも、ハンドの自由度をできるだけ少なくして、大きなものを持つことができる。また、把持対象

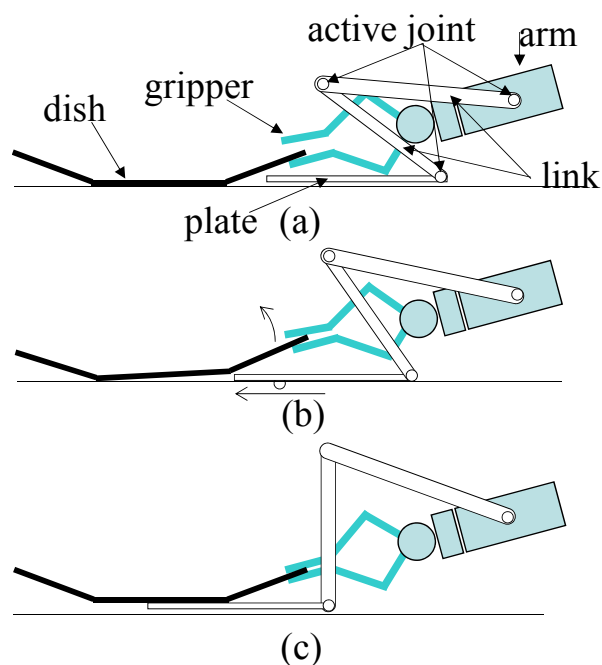


Fig.6.3 The sequence of grasping a dish

物の自重を支持機構で支えているため、グリップの把持のために高出力アクチュエータを用いる必要がない。また、この板はアームがいかなる姿勢をとっても水平とすることができれば、簡単な制御で姿勢維持を実現できる。さらに、皿など、従来は持ちにくかった板状の物体でも、把持を行うことができ、今回のターゲットである、食器類のハンドリング作業に好適といえる。

### 6.3 下面支持ハンド搭載アームシステム設計

先述の特徴を持った USE ハンド、およびそのアーム機構の設計について述べる。本機構では、グリップの手先位置に対して、板を任意の位置で常に水平方向に移動させなければならない。このためには、通常は3自由度の機構が必要となる。さらに、テーブル面に板を押し付けながら水平方向に移動させる力制御も必要となる。3自由度を全て能動関節で構成し、アクチュエータや力センサ等を手先付近に追加した場合、手先付近の重量増、およびアーム全体の重量増を招き、周囲環境や人との接触の可能性など危険性も増してしまう。そこで、能動関節はできるだけ少なくし、アクチュエータもできるだけアームの根元に配置する構成とする。

概念構成図を Fig.6.4 に示す。このように、板を2つの能動回転軸 (Joint-A1, Joint-A2) を持つリンク(Link-A1, Link-A2)の先に取り付ける。Joint-A1, Joint-A2 の2つの回転軸には、アーム根元に配置したアクチュエータ(Motor-A1, Motor-A2) から、アーム各関節(Joint-2, Joint-3, Joint-4)と共通の回転軸をもつ自由回転の中継タイミングプーリ、およびタイミングベルトを介して、動力伝達が行われる。これにより、手先にアクチュエータを追加することなく、能動可動部を構成できる。また、アーム回転軸と、中継プーリの回転軸を一致させることで、平行リンク系となり、Motor-A1, Motor-A2 の出力角度を固定することによって、板を常に同じ姿勢(例えば水平)に保つことが出来る。なお、手先に直動アクチュエータを配置する構成や、板面に対して垂直な回転軸を設けて皿の横から下に滑り込ませる構成も検討したが、アームの動きや周囲環境と板機構部ができるだけ干渉せず、また、未使用時には板機構部を折り畳むことのできる、本リンク式機構を採用した。

次に、Fig.6.5 に、板機構部の動作説明図を示す。板の根元には受動回転軸 Joint-A3 があり、ねじりバネで板がテーブルに押し付けられる方向に常に力が加わっている。また、メカストップで Link-A2 と板のなす角が一定以上にならないように構成されている。この構成で、最初に折りたたまれた状態(a)から、(b)のように、Joint-A1, Joint-A2 を駆動して、板の先端をテーブル面に押し付けるように位置制御する。このとき、ねじりバネの効果によって、テーブルに対する押し付け力が発生する。この状態で(c)のように、板をテーブル面とほぼ平行を保ったまま、食器の下にすべりこませることができるので、テーブル面に沿った動きを力制御を必要とせず、受動的に生成できる。なお、ねじりバネの選定については、ねじりバネ無しでも平滑なテーブル面の上では板の自重(50g)により滑りこませることはできるが、テーブルクロスなどの厚手の生地がある場合、把持対象物の自重による

沈み込み等の生地の変形により、滑りこませるときに板の先端が引っかかる場合があった。そこで、基準の把持対象物として立方体を設定し、その質量を最大把持重量である 1kg と設定し、4 辺の縁の内の 1 辺にかかる自重 250g 相当と同じ力で生地を押し付けながら板を滑りこませることとした。図 4 のように Joint-A3 の角度が 90 deg でメカストップ接触時に、板先端で 250g の押し付け力が発生するようにねじりバネを選定し、引っかかりの頻度が低下することを確認した。ただし、金属等の固い物体で角の R が極端に小さい場合は、すべりこませることが難しい場合もある。

次に、板が食器の下に滑り込んだ状態で、Joint-A3 を(d)のようにメカストップが作用する位置になるように Joint-A1, Joint-A2 を制御すれば、持ち上げたときに食器の重量がかかっても、一定の姿勢を保つことができる。このように、通常は 3 自由度必要である支持機構を、受動機構を用いることによって 2 自由度で実現している。

次に、本機構における食器類の各形状に対する把持パターンを Fig. 6.6 に示す。①平らな板状の食器、②碗形状の食器（お碗、丼等、上部縁を持てるもの）については先述のとおりである。一方、③円筒状の食器においては、グリップで水平方向から力を加えて把持し、下から板で支えて持つ。また、④その他小物については、従来は精密な把持が必要であったが、グリップで押さえながら、板を滑りこませることにより、精密把持の必要はなく、下から支えて把持することができる。また、本機構によれば、箱形の物体も、グリップで箱の反対側を押さえつつ、箱の下に板を滑りこませることにより、把持することが可能である。さらに、柔らかい形状や、不定形状の物体についても、下から支えることにより、形が崩れることなく、把持を行うことができる。このように対象物の形状に応じてアームおよび支持機構の動作を変えることによって、様々な形状の物の把持が可能である。このように、アームの途中からリンクを分岐する構造とすることで、双腕にせずとも把持対象物を把持し、かつ下から支えたり、大きな把持対象物を挟んで持つ動作も可能となり、システムの質量の低減、構造の小型化を実現している。

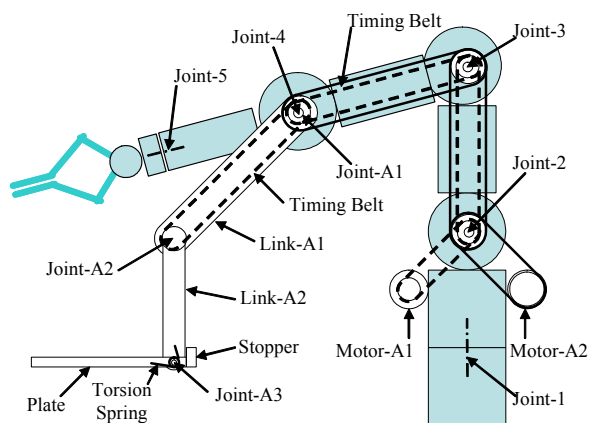


Fig.6.4 The mechanism outline figure of a system

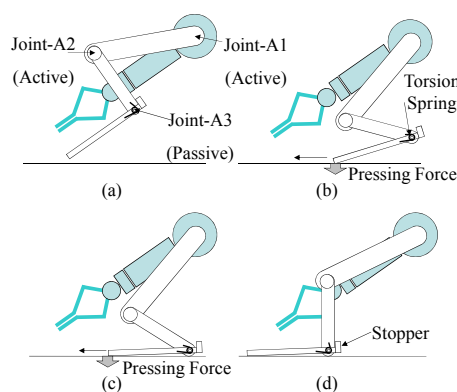


Fig.6.5 Details in hand part

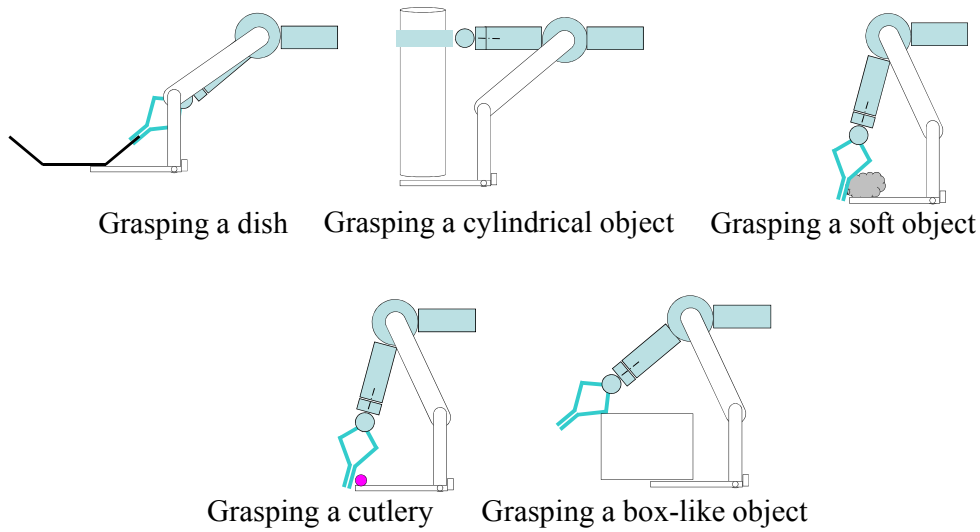


Fig.6.6 The pattern of grasping tableware

実際に試作したアームシステムを Fig.6.7 に示す. 今回提案する機構の検証のため市販の 5 自由度アーム(katana アーム)をベースとして, リンク等の機構を追加した. アクチュエータは, 30W のものを 2 個根元に配置し, 板部では 2kg の食器まで支えられるように設計した. また, このアームを搭載し, テーブルの配膳, 片付けを行う移動ロボットシステムを Fig.6.8 に示す. このロボットは, 全方向移動が可能であり, さらに, アームが載る台は上下移動を行うため, 皿の水平, 高さ位置に手先位置を合わせることができる.



Fig.6.7 The arm for handling tableware

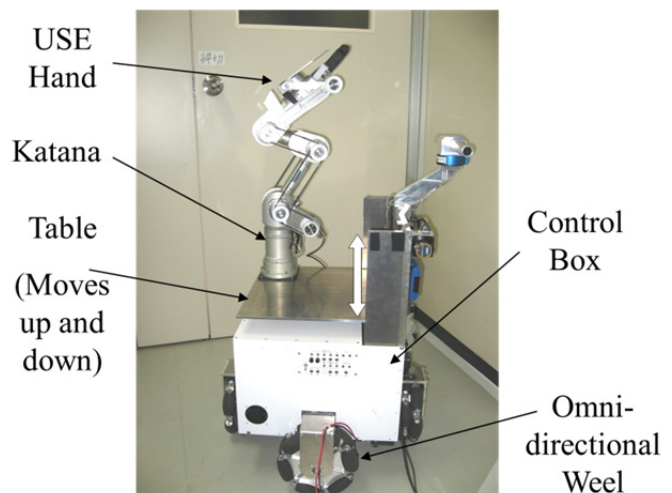


Fig.6.8 The mobile robot for handling tableware

## 6.4 下面支持ハンドの把持安定性の解析

本機構による食器把持の安定性を解析し、これを考慮した動作制御を行う。まず、Fig.6.9に示すように丸皿のモデリングを行った。皿の底面の半径  $R$ 、皿の縁の径  $r$ 、皿の縁の傾き  $\theta$  とする。皿は2次元の断面モデルとし厚さは無視する。皿の原点を底の中心とし、重心も同じ位置とする。まず、Fig.6.9(a)のように、皿の端を平行2指グリッパで持つことを考える。平行2指グリッパで持つ部分の長さ  $w$  とする。安定性については、凸多面錐理論[11]に基づく許容力集合をもとに評価を行う。ここで許容力は、把持されている皿の重心に外力を加えた場合、把持が外力に耐えられなくなり、皿が把持から外れる時の外力とする。ハンドと皿の接触は、図の  $P_1$  から  $P_4$  とし、把持状態をグリッパ先端と皿の端部それぞれの位置でグリッパが皿を挟んで2点で接触したとし、合計4点で接触しているという状態で表し簡易化する。今、接触点  $P_i$  の位置座標を、 $x_i$  とすると、

$$\begin{aligned} x_1 &= (R + r \cos \theta, r \sin \theta)^T \\ x_2 &= (R + (r - w) \cos \theta, (r - w) \sin \theta)^T \\ x_3 &= (R + r \cos \theta, r \sin \theta)^T \\ x_4 &= (R + (r - w) \cos \theta, (r - w) \sin \theta)^T \end{aligned} \quad (6-1)$$

接触点  $i$  において、垂直抗力  $N_i$  がかったとすると、面方向に摩擦力  $\mu_i N_i$  が発生する。よって、各接触点での垂直抗力と摩擦力の合力は Fig.6.9 に示す錐の中に入る。この合力を錐の稜線方向単位ベクトル  $u_{i\alpha}$ 、 $u_{i\beta}$  を用いて、

$\lambda_{i\alpha} u_{i\alpha} + \lambda_{i\beta} u_{i\beta}$  (ここで、 $\lambda_{i\alpha} > 0, \lambda_{i\beta} > 0, \lambda_{i\alpha} + \lambda_{i\beta} < N_i \sqrt{1 + \mu_i^2}$ ) と表す。座標  $x_i$  の点において、単位ベクトル  $u_i$  方向に加わる力 (大きさ  $f_i$ ) が座標原点に及ぼす並進力  $F_{ix}, F_{iy}$  とモーメント  $M_i$  は、以下の式 (6-2) で表される。

$$\begin{pmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ M_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_i \\ x_i \times u_i \end{pmatrix} f_i \quad (6-2)$$

以上より、各点での接触力から、皿座標原点にかかる合計の並進力、モーメントが計算できる。

これが外力に対する反力となる。通常皿などを運ぶ場合、平行移動が多いと考えられるので、モーメントよりも、並進力の外力に対する安定性を評価する。今、 $R = 100 \text{ mm}$ 、 $r = 50 \text{ mm}$ 、 $\theta = 20 \text{ deg}$ 、 $w = 20 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 20 \text{ deg}$ 、 $M_i = 0 \text{ Nm}$  とし、さらに摩擦係数  $\mu$  は基礎実験により  $0.6$  とし、ハンドアクチュエータ出力の制限を考慮するため、式 (6-3) のように各点での垂直抗力の和を  $20 \text{ N}$  とする。

$$\sum_i N_i \leq 20 \quad (6-3)$$

許容力集合は数値計算により総当りで求めた。結果を Fig.6.10(a)に示す。このように、特に重力方向において、許容力が小さい。これは皿の端を持つことにより、ハンドにかかる

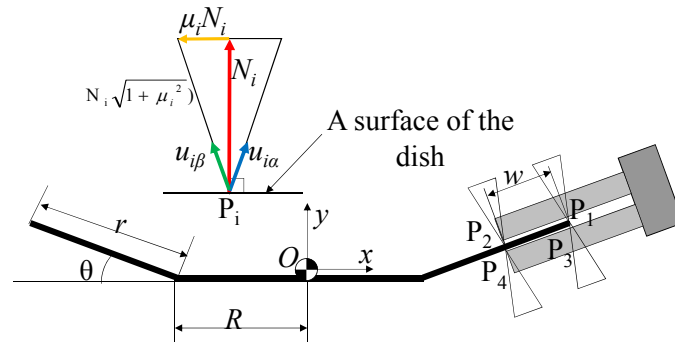


モーメントに起因する力が大きくなることによる。一方、水平方向の許容力は摩擦により、重力方向よりも大きくなっており、水平方向には安定して把持できることがわかる。

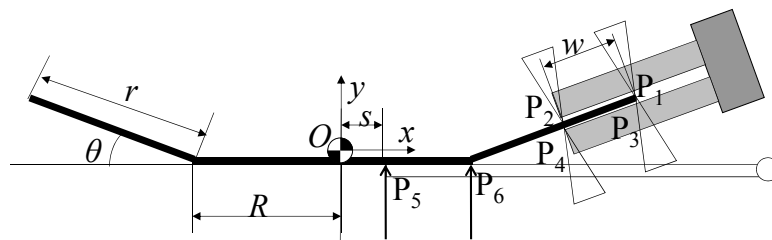
次に提案する機構での安定性を見る。このときのモデリングを Fig.6.9(b)に示す。皿と板の接触は平面分布ではなく板の先端(P<sub>5</sub>)および皿の端(P<sub>6</sub>)の2点とし、簡易化する。つまりこの場合は、接触点が6個となる。また、この板と皿の接触点における摩擦係数 $\mu$ は0とする( $\mu_5, \mu_6=0$ )。これは、板を皿の下に滑り込ませるために、板の表面は滑りやすい材質とするためである。ここで、垂直抗力 $N_i$ の合計を(a), (b)で同じとし(式(3)), 出力を揃えて比較する。以上の条件により求めた許容力集合を Fig.6.10(b)に示す。本機構により、大幅に安定な領域が広がったことがわかる。特に重力(-y)方向において、ほぼ6倍の並進力が許容されている。

また、本機構においては、板の先端位置 $s$ によって、把持安定性は異なる。そこで、板の先端位置と把持安定性の関係を求める。上述の方法と同様にして求めた許容力集合を Fig.6.11に示す。このように板の先端が重心位置にある時、把持安定性は大きくなる。実際には、大きな皿の場合は重心位置まで板の先端を持ってくるのは困難であるが、少しでも皿の下に板を滑りこませることによって、大幅に把持安定性が增大することがわかる。よって、効率的に作業を行うためには、要求される把持安定性、皿の重量、ハンドの把持力などを元に板の位置を制御すればよい。

以上、本機構により把持トルクを下げるができるため、アームのモータ低出力化を実現できる。



(a) Grasping by only parallel 2 finger gripper



(b) Grasping by a parallel 2 finger gripper and a plate

Fig. 6.9 The coordinate system of grasping a plate

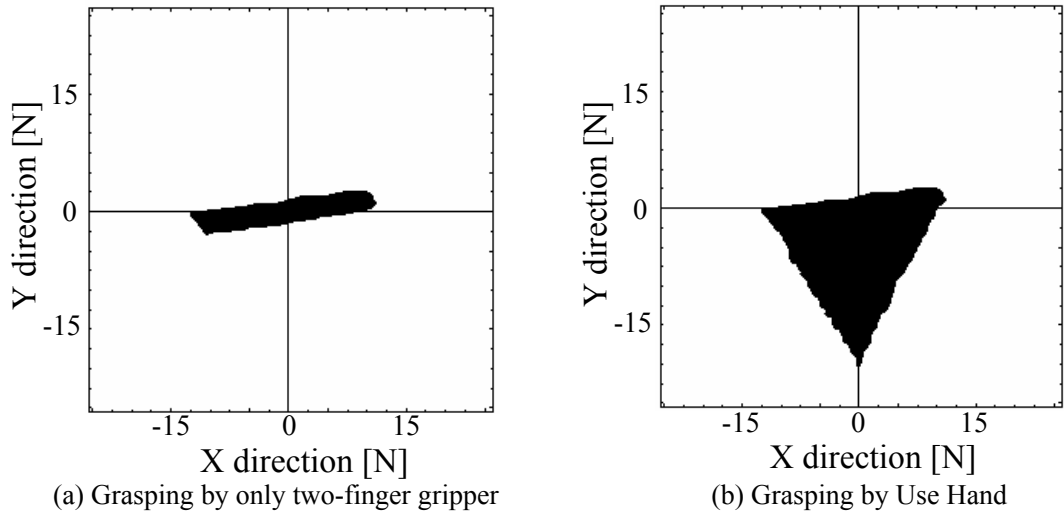


Fig. 6.10. Admissible external force set

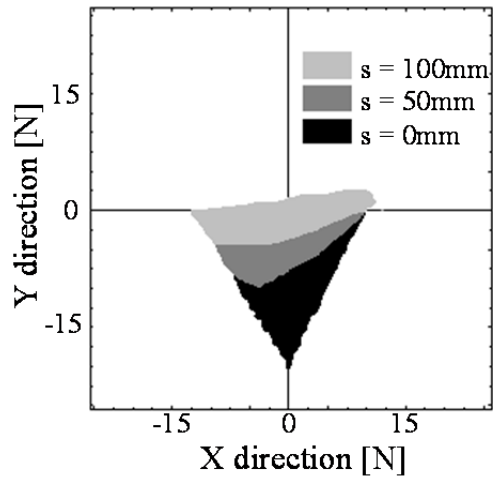


Fig.6.11 Stability by the position of the tip of plate

## 6.5 下面支持ハンドのトルク軽減効果の検証

本システムは必要なモータ出力とモータ数を抑えるため、各関節の出力を複数のモータで配分する干渉駆動機構[6-12]を採用した。この機構を制御するため、関節とモータの角度、トルクの関係を導出する。ここで、Fig.6.4のように関節を定義したとして（ただし、ねじり方向の関節軸は省略する）、各モータ回転角度 $\theta_m$ と、各関節角度 $\theta_j$ の間には、機構より式(6-4)のような干渉行列 ${}^mT_j$ で表される関係がある（ただし、タイミングベルト、プーリ伝達機構の減速比は全て1:1とする）。この式(6-3)をもとに、各モータの関節角制御を行う。また、把持対象物の重量に起因するモータトルク $\tau_m$ と関節トルク $\tau_j$ との関係は、仮想仕事の原理により、式(6-4)の干渉行列の転置行列によって、式(6-5)ように求まる。

$$\theta_{mi} = {}^mT_j \theta_{ji} \quad (i = 2, 3, 4, A1, A2)$$

$${}^mT_j = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (6-4)$$

$$\tau_{ji} = ({}^mT_j)^T \tau_{mi}$$

$$({}^mT_j)^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6-5)$$

ただし、式(6-5)は、タイミングベルトプーリ機構での損失を考慮しておらず、ベルトプーリ1組あたりの効率を $\eta$ とすると式(6-6)のように表せる。

$$\begin{pmatrix} \tau_{j-2} \\ \tau_{j-3} \\ \tau_{j-4} \\ \tau_{j-A1} \\ \tau_{j-A2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \eta & \eta \\ 0 & 1 & 0 & \eta^2 & \eta^2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta^3 & \eta^3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \eta^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_{m-2} \\ \tau_{m-3} \\ \tau_{m-4} \\ \tau_{m-A1} \\ \tau_{m-A2} \end{pmatrix} \quad (6-6)$$

よって、式(6-6)の逆行列より、

$$\begin{pmatrix} \tau_{m-2} \\ \tau_{m-3} \\ \tau_{m-4} \\ \tau_{m-A1} \\ \tau_{m-A2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\frac{1}{\eta^2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{\eta} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\eta^3} & -\frac{1}{\eta^4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\eta^4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_{j-2} \\ \tau_{j-3} \\ \tau_{j-4} \\ \tau_{j-A1} \\ \tau_{j-A2} \end{pmatrix} \quad (6-7)$$

となり、各ジョイントにかかるトルクから、モータトルクを算出できる。

本アーム機構ではモータを根元に配置し、干渉駆動を行うことにより、食器を把持する場合にシステムで必要な総トルクを減少させる設計である。そこで、把持対象物の重量に起因するモータトルクの絶対値の和を、干渉駆動機構を追加していない katana アーム単独で食器を把持する場合 (Fig.6.12(a))  $\tau_{a\_all}$  と、干渉駆動機構を追加した場合 (Fig.6.12(b))  $\tau_{b\_all}$  を比較する。主な作業範囲における、各手先位置での関節角を求め、静的に必要な関節トルクを算出し、式 (6-6) を用いて、各モータトルクに変換することで、各手先位置で必要なモータトルクの和を求める。今、効率を  $\eta=0.9$  とし、Fig.6.12 のように、質量 1kg で縁の角度が 45(度)の皿を保持する場合の、各手先位置で必要なモータトルクの総和を、従来の機構と本提案の機構でそれぞれマッピングした結果を Fig.6.13 に示す。このグラフは必要なトルク総和が大きい程、赤い色で表示している。本アーム機構における、実際の手先軌道生成においては、Fig.6.13(b)のマップを利用しトルク総和が小さくなるように手先軌道経路を決定すればよい。

また、Fig.6.13 の結果を元に、従来と本機構のモータトルク総和の比  $\tau_{b\_all}/\tau_{a\_all}$  をマッピングしたものを Fig.6.14 に示す。このグラフでは、 $\tau_{b\_all}/\tau_{a\_all}$  が小さいほど、青い色で表示している。このように、ほとんどの領域において、把持対象物の重量に起因するモータトルクの総和は減少し、従来と比較して約7割のトルクで食器の把持を行えることがわかる。

よって、本機構では、モータを2つ追加しているが、katana アームの出力も含めた総出力的には、従来の機構よりも小さくすることができる。また、従来の機構で様々な形状、重量の物体を把持しようとする時、グリップ部は複雑な多自由度機構となり、必要なモータトルクがさらに増える可能性もあるため、本機構が有利といえる。

以上、本干渉駆動機構により、必要なモータトルクが軽減されるためアームのモータ低出力化を実現できる。

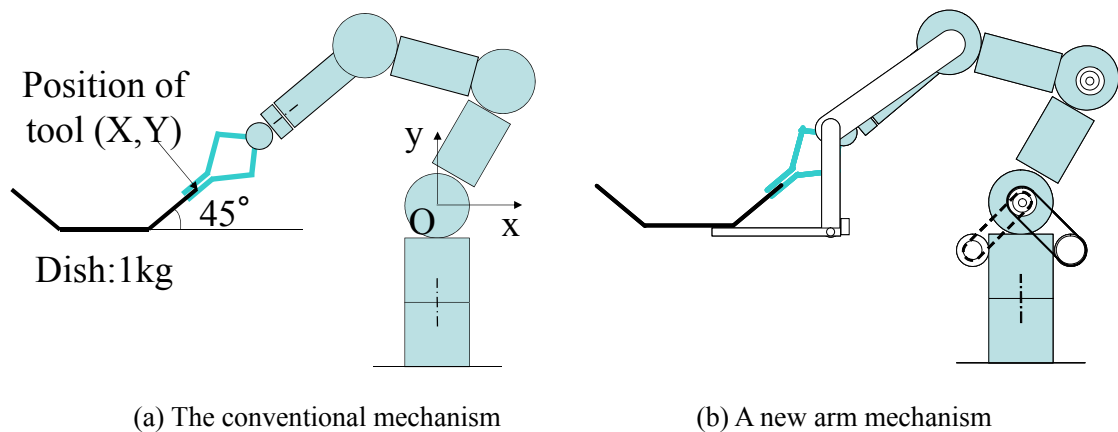
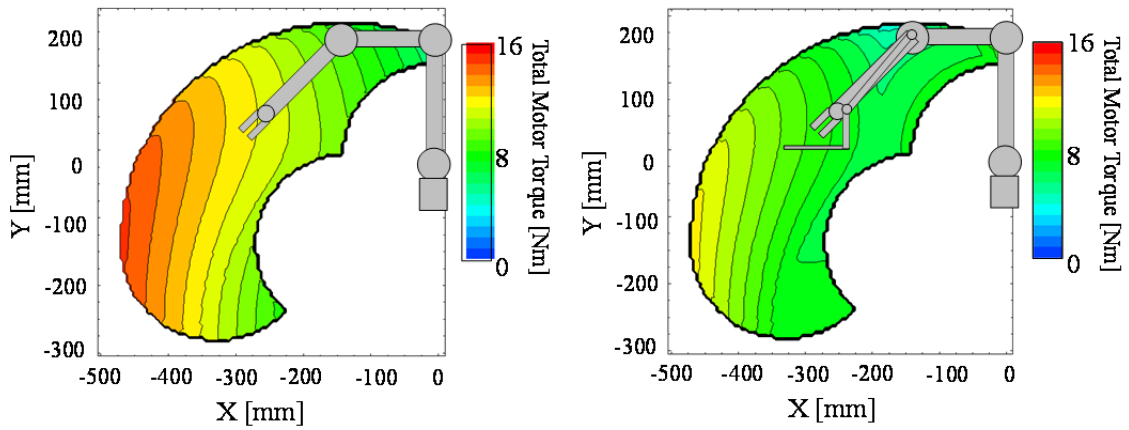


Fig.6.12 The type of two arms



(a) The conventional mechanism

(b) A new arm mechanism

Fig.6.13 The map of the total torque

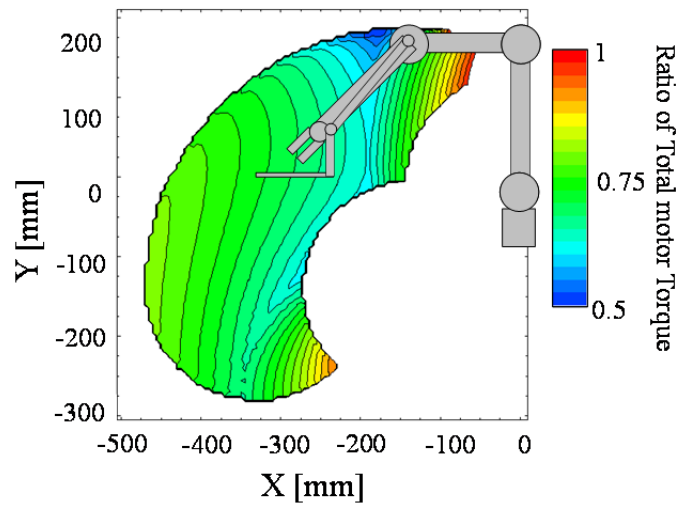


Fig.6.14 The map of the ratio of total torque

## 6.6 食器ハンドリング実験

製作したアームによる動作検証のための基礎実験を行った。まず、Fig.6.15 に皿の把持の様子を示す。なお、皿の形状、位置は本来はセンサなどを用いて検出するが、今回は、機構動作確認のためこれらの情報はあらかじめ与えてあり、これをもとに手先、リンク軌道制御を行った。皿に対してグリップは横からアプローチを行い皿の端を持って持ち上げた後、リンクを駆動させて板を皿の下に滑り込ませる。ただし、皿の高さが低いと、グリップの指が皿の下に入らず、皿の端を持ってないことも考えられる。このような場合は、例えば Fig.6.16 に示すように、皿が移動しないように板側と反対側からグリップで押さえつつ、板を皿の下に滑り込ませることができる。同様に、細かい小物類の箸、カトラリー類も、移動しないようにグリップで反対側から把持対象物を押さえながら板を滑り込ませて、板に載せて移動させることもでき、精密な位置姿勢を検出しなくても、カトラリーの回収などが行える。次に、トレイの把持の様子を Fig.6.17 に示す。皿と同じように把持を行い、トレイの姿勢を保ったまま移動させる一連の動作を示している。このように、従来のハンドでは把持が困難であったトレイについても安定した把持を行い、移動させられることを確認できた。さらに、円筒物体の把持の様子を Fig.6.18 に示す。この場合は、グリップで水平方向から円筒をつかみ、その後、板を円筒物体の下に滑り込ませて把持を行う。このように、高さのある円筒物体でも安定して把持、移動が行えることを確認できた。さらに、箱の把持の様子を Fig.6.19 に示す。この場合は、箱の下に板を滑りこませるために、ハンドで箱の反対側を支持する。この状態で板を滑りこませ箱を把持できることを確認した。

以上の実験により、皿、トレイ、円筒物体、箱の従来は一つのハンドでは困難であった様々な種類の物体の把持が容易に行えることが確認できた。



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig.6.15 Experimental result of grasping a dish



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig.6.16 The experimental result of grasping a dish

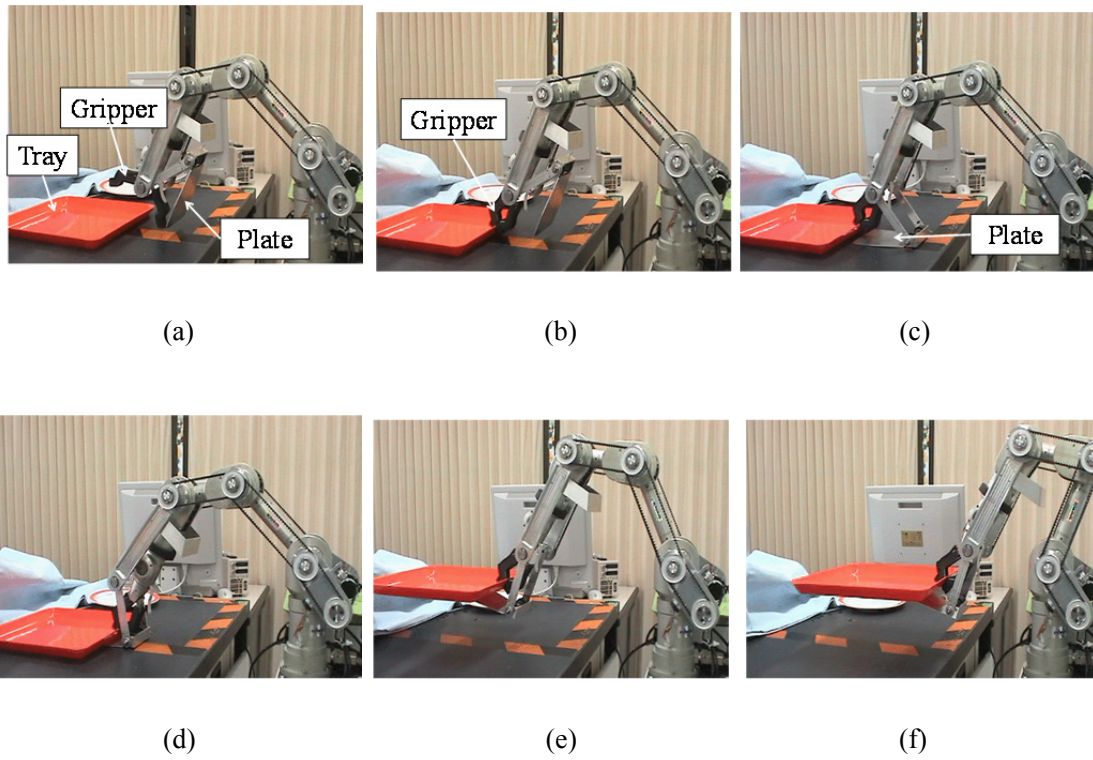


Fig.6.17 The result of grasping and handling a tray

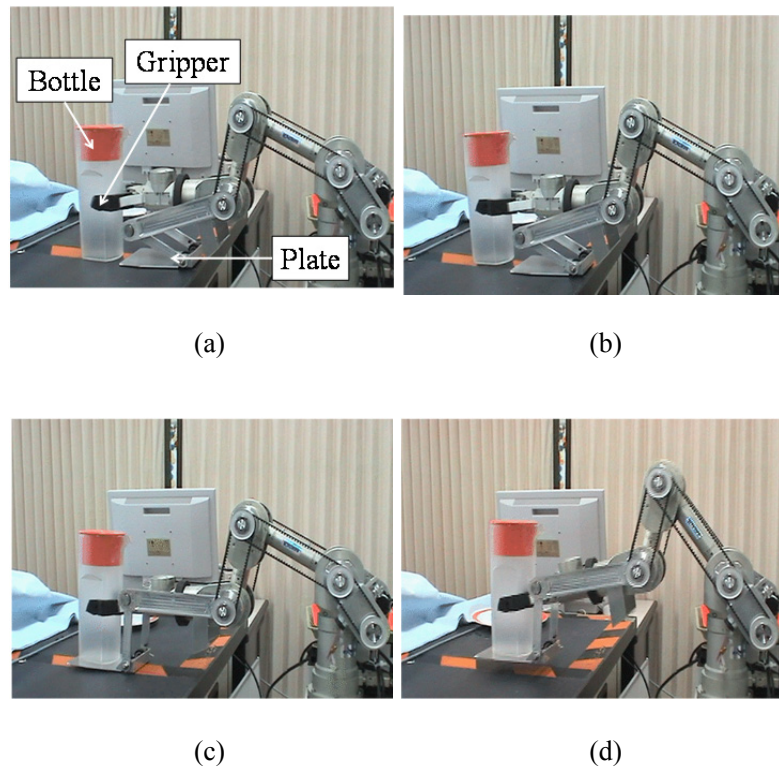
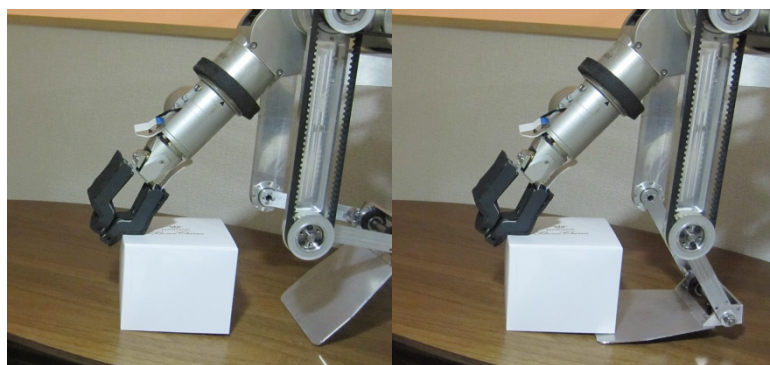


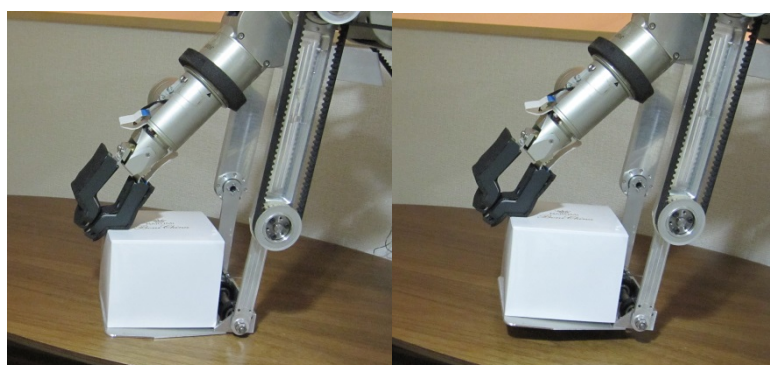
Fig.6.18 The result of grasping a cylindrical object





(a)

(b)



(c)

(d)

Fig.6.19 The result of grasping a box

## 6.7 下面支持ハンド搭載アームの安全に関する特性評価

今回試作した下面支持ハンド搭載アームと、3章で述べた各関節にアクチュエータを配置したアームとの仕様の比較結果を Table 6.3 に示す。また、本アームの機構的特徴と、機構的安全対策との関係および評価を示す表を Table 6.4 に示す。まず、質量に関する項目については、3章のモータ関節配置型アームと比較して、下面支持ハンド搭載アームの可動部は質量はほぼ同じとなっている。ただし、下面支持ハンド機構により、アーム可搬重量はモータ関節配置型アームの2倍となった。次に、出力に関する項目については、静止時の最大関節トルク総和（アーム水平に真っ直ぐ伸ばした状態）で比較する。この結果より、関節トルク総和を-28%にできていることがわかる。次に構造の小型化に関する項目については、単体でアーム平均断面積比較すると下面支持ハンド搭載アームはモータ関節配置型アームの2倍となっている。しかしながら、多様な形状の物体を扱うために大型で重い多関節グリップに変更して、可搬重量を2倍にしようとする、さらに高出力の大型なアームが必要であり、また、大型の物体を把持しようとする、さらには高出力の大型なアームが必要であり、また、大型の物体を把持しようとする、さらには高出力の大型なアームが必要である等、同等の機能を実現しようとする、これ以上のアームシステムの大型化が必要で

ある可能性があり、下面支持ハンド搭載アームにより構造の小型化は実現できていると考えられる。

本アームの提案機構のそれぞれの効果については、①下面支持ハンドがハンドを多指多自由度化せずに様々な物体の把持を可能としたことによる、質量の軽減と、把持力の軽減によるモータ低出力化に貢献している。また、②アームの途中からリンクを分岐する構造は、双腕化せずに単腕での把持を可能としたことによる、質量の軽減と構造の小型化に貢献している。さらに、③干涉駆動機構については、アーム関節トルク総和を抑えることによるモータ低出力化に貢献している。

なお、これらの効果による質量特性を基にした接触許容速度の評価については、7章で他のアームとまとめて行う。

Table 6.3 Under Supported Extension Type vs Actuator Mounted Type

	モータ関節 配置アーム	下面支持ハンド 搭載アーム
可搬重量	0.5 kg	1.0 kg
全質量	4.0 kg	5.0 kg
可動部質量 (グリッパ含む)	3.6 kg	3.7 kg
必要モータ出力 (アーム自重のみの最大 静止トルク総和)	10.8 Nm	7.8 Nm
必要モータ出力 (最大可搬重量時の 最大静止トルク総和)	13.1 Nm	12.8 Nm
最大到達距離	640mm	660mm
サイズ評価 (アーム平均断面サイズ)	Φ65mm	120mm × 60mm

Table 6.4 Relationship between Proposed Mechanism and Mechanical Safety Measure

	質量の低減	モータ低出力化	構造の小型化
下面支持ハンド搭載アーム全体	可動部質量 +3%	把持力の軽減 -83% アーム関節トルク総和 -28%	双腕化せずに 単腕での把持を 可能とした
①下面支持ハンド	○ ハンドを多指多自由度 化せずに様々な物体 の把持を可能とした	○ 把持力の軽減 -83%	
②アームの途中からリンクを 分岐する構造	○ 双腕化せずに単腕で の把持を可能とした		○ 双腕化せずに 単腕での把持を 可能とした
③干涉駆動機構		○ アーム関節トルク総和 -28%	

## 6.8 下面支持ハンド搭載アームのまとめ

本章では，人ロボット協働タスクの具体例としてテーブル配膳片付け作業を行うロボットの開発を目指し，食器類を安定把持することのできるハンド機構，およびアームシステムの設計について述べた．本機構の特徴である，把持対象の下に板を滑り込ませることによって，簡易な機構および制御で食器として用いる様々な形状の物体を安定に把持できることを解析および実験により確認した．さらに，大きなアクチュエータを用いることなく，また，モータをアームの根元に配置した干渉駆動機構の採用により，所望の可搬重量を実現する食器ハンドリングシステムの設計試作を行い，把持実験から本機構の有効性を確認した．さらに，3章で述べたモータ関節配置型アーム等と比較し，質量の低減，モータ低出力化，構造の小型化について効果を確認し，提案機構のそれぞれの項目に対する効果の度合をまとめた．

なお，これらの効果による安全に関する質量特性の評価については，7章で他のアームと共にまとめて述べる．

## 第7章 各アームの安全に関する特性評価

本章では，4章から6章まで述べてきたアームの機構と安全性に関する機構的対策（質量の低減，モータ低出力化，構造の小型化）についての評価をまとめる．さらに，各アームの質量特性を2章の方法で評価し，可動範囲における接触時の伝達エネルギーの分布および安全な速度について検証する．

### 7.1 各アームの機構と安全性の評価

まず，第4章から第6章で提案したアームの機構と安全性に関する機構的対策（質量の低減，モータ低出力化，構造の小型化）についての評価をまとめたものを Table 7.4 に示す．ワイヤ駆動アームは，可動部質量-70%を達成し，質量の低減効果が最大であった．また，モータの低出力化についても高い効果が見られた．重力補償アームは，静止時に必要な最大トルク-90%を達成し，モータの低出力化効果が最大であった．また，質量の低減についても高い効果が見られた．下面支持ハンド搭載アームについては，把持力の軽減や関節トルクの軽減によるモータの低出力化や，トレイなどの大型把持対象物を把持するために双腕化せずに単腕での把持を可能としたことにより，構造の小型化の効果があつた．

Table 7.1 Relationship between Proposed Mechanism and Mechanical Safety Measure

	質量の低減	モータ低出力化	構造の小型化
ワイヤ駆動アーム	◎ 可動部質量 -70%	○ 必要トルク -53%	○ アーム直径 -10mm
重力補償アーム	○ 可動部質量 -60%	◎ 必要トルク -90%	○ アーム断面積平均-40%
下面支持ハンド搭載アーム	△ 可動部質量 +3%	○ 把持力の軽減 -83% アーム関節トルク総和 -28%	(○) 双腕化せずに単腕での 把持を可能とした

## 7.2 ワイヤ駆動アームの質量特性

次に4章から6章まで述べてきたアーム機構の質量特性を2章の方法で評価し、可動範囲における接触時の伝達エネルギーの分布および安全な速度について検証していく。

ワイヤ駆動アームの質量特性の評価は以下の条件において行う。

- ・手首の3軸分の関節は固定とする。

手先速度への影響が大きい、肩と肘の合計4軸分の関節を動かすものとして行う。

- ・力の作用点はハンドの先端とする。作用点の並進速度を考える。

今、座標系を Fig.7.1 のように、DH法で設定し、図のようなリンクパラメータとする。

なお、ベース座標系は  $\theta_1 = 0 \text{ deg}$  の時の第1軸座標系と同一とする。

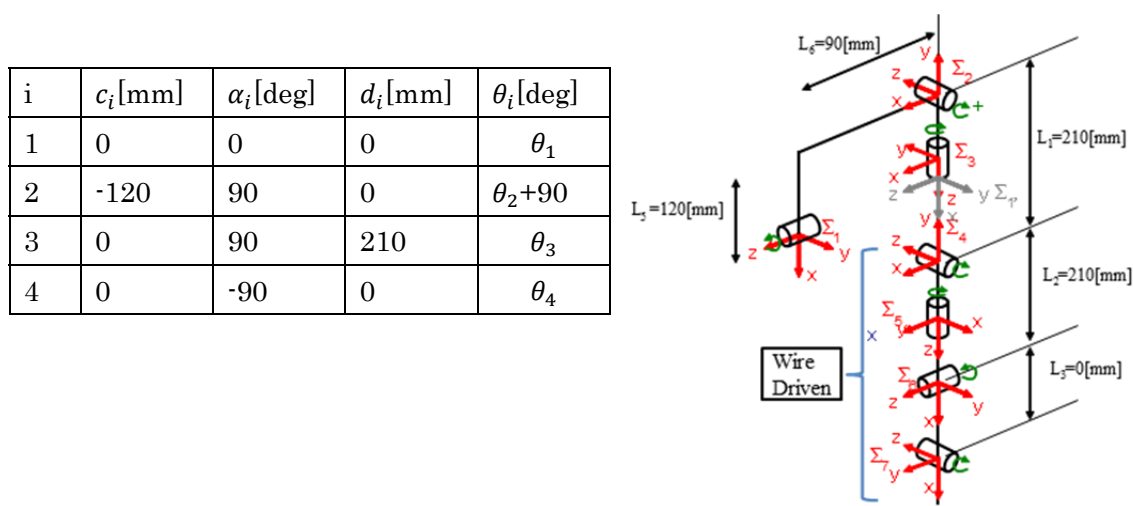


Fig.7.1 Link Parameter

第  $j$  軸の方向から第  $j$  軸の方向への回転行列を  $R_j^i$  とすると、それぞれの回転軸の方向の変換行列は式(7-1)のように表される。

$$\begin{aligned}
 R_1^2 &= R_z(\theta_1) R_x(90) \\
 R_2^3 &= R_z(\theta_2 + 90) R_x(90) \\
 R_3^4 &= R_z(\theta_3) R_x(-90)
 \end{aligned} \tag{7-1}$$

よって各軸の方向ベクトル  $\mathbf{a}_i$  をベース座標系で表すと、式(7-2)のようになる。

$$\mathbf{a}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_2 = R_1^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_3 = R_1^2 R_2^3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_4 = R_1^2 R_2^3 R_3^4 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{7-2}$$

各リンクのベース座標系での慣性テンソル  $I_i$  [kgm<sup>2</sup>] はそれぞれ式(7-3)のように表される。

$$\begin{aligned}
I_1 &= \begin{pmatrix} 0.00189 & 0.00098 & 0.00112 \\ 0.00098 & 0.00197 & 0.00146 \\ 0.00112 & 0.00146 & 0.00558 \end{pmatrix} \\
I_2 &= R_1^{2T} \begin{pmatrix} 0.00026 & 0.00011 & 0.00009 \\ 0.00011 & 0.00028 & 0.00008 \\ 0.00009 & 0.00008 & 0.00014 \end{pmatrix} R_1^2 \\
I_3 &= (R_1^2 R_2^3)^T \begin{pmatrix} 0.00122 & 0.00006 & 0.00002 \\ 0.00006 & 0.00135 & 0.00003 \\ 0.00002 & 0.00003 & 0.00009 \end{pmatrix} R_1^2 R_2^3 \\
I_4 &= (R_1^2 R_2^3 R_3^4)^T \begin{pmatrix} 0.03775 & 0.00122 & 0.00985 \\ 0.00122 & 0.00228 & 0.00105 \\ 0.00985 & 0.00105 & 0.03614 \end{pmatrix} R_1^2 R_2^3 R_3^4
\end{aligned} \tag{7-3}$$

関節軸 $j$ からリンク $i$ の重心までのベクトル  $\mathbf{r}_{ji}$  は式(3-7)と同様に求まり、3.3節と同様にして

手先位置に関する一般化慣性楕円体が求まる。これよりアーム手先の接触方向の仮想質量が求まる。Fig.7.2に手先位置における仮想質量最大値の分布を示す。なお、2次元平面上（ベース座標系のZ-X平面）で傾向を確認するため、アーム姿勢の $\theta_1$ と $\theta_3$ は0とし、 $\theta_2$ と $\theta_4$ を変えて解析を行った。この分布の平均値をとると、2.29kgとなった。また、この分布を見ると、手先位置がアーム基部から離れるほど仮想質量が大きくなる傾向があることがわかる。さらに、許容接触エネルギー内での最大速度の分布をFig.7.3(上腕接触を考慮した場合)、Fig.7.4(顔接触を考慮した場合)に示す。なお、Fig.7.3の最大速度の平均値は0.85m/s、またFig.7.4の最大速度の平均値は0.26m/sであり、目標としていた0.25m/sを達成している。

次にアームの関節速度で評価する。式(2-5)で表される接触許容エネルギーとの比率 $r_E$ を求めてプロットした結果をFig.7.5、Fig.7.6に示す。Fig.7.5は、上腕接触を基準として可動範囲にわたって $r_E < 1$ となる関節速度（ $-78\text{deg/s} < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 78\text{deg/s}$ ）を総当りで求め、この速度条件のもとで $r_E$ をプロットしたものである。また、Fig.7.6は、顔接触を基準として可動範囲にわたって $r_E < 1$ となる関節速度（ $-30\text{deg/s} < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 30\text{deg/s}$ ）を総当りの求め、この速度条件のもとで $r_E$ をプロットしたものである。この関節速度以内で動作させれば、それぞれの接触許容エネルギー以下でアームを駆動できることになる。また、エネルギーの分布を見ると、 $\theta_2$ 軸から離れるにしたがってエネルギーは大きくなっており、さらに $\theta_1$ 軸線上から離れるにしたがってエネルギーが大きくなっている。関節構成がモータ関節配置型アームと似ているため、似たような分布の傾向となっている。

3章で述べたモータ関節配置型アームと比較した表をTable 7.1に示す。またグラフにしたものをFig.7.7に示す。この結果より、ワイヤ駆動アームのほうが、仮想質量を約64%に低減でき、約1.5～1.7倍の速度で駆動できることがわかり、質量特性の向上度合がわかる。

Fig.7.8に各機構の効果とそれによる安全性を考慮した特性向上結果の関係を示す。各機構の効果により、質量の低減、モータの低出力化、構造の小型化が図られ、その結果、本節で述べたような安全性を考慮した特性の向上が見られた。代表的なものとして、仮想質量は基準アームと比較して、-36%、顔を考慮した接触許容速度は +73%となっている。

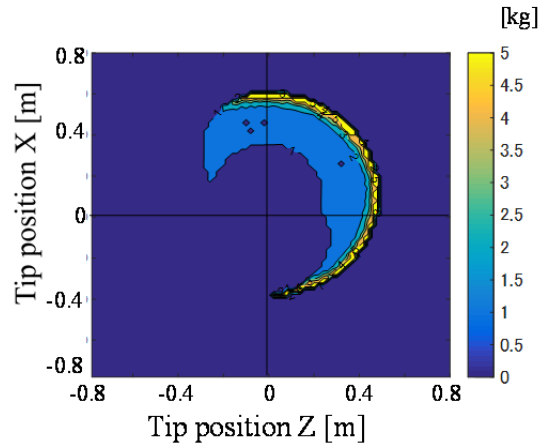


Fig.7.2 Virtual Mass (Average 2.29kg)

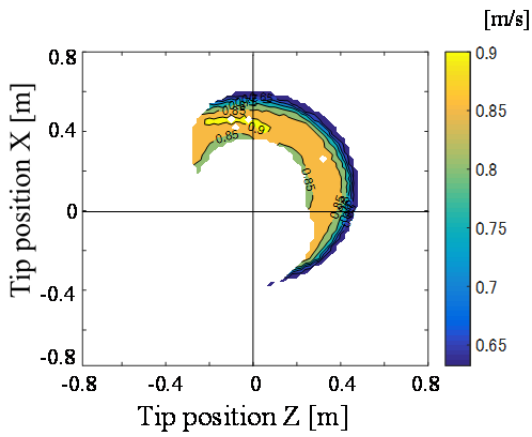


Fig.7.3 Max Velocity (upperarm, Average 0.85m/s)

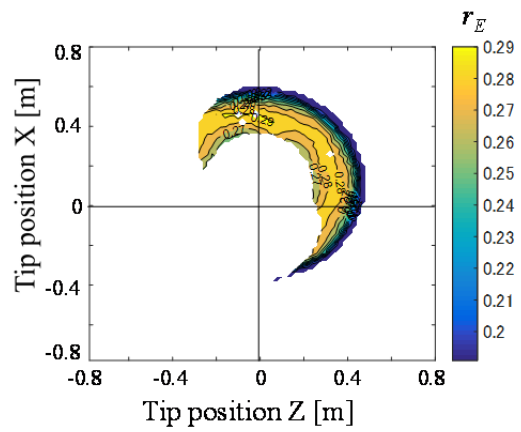
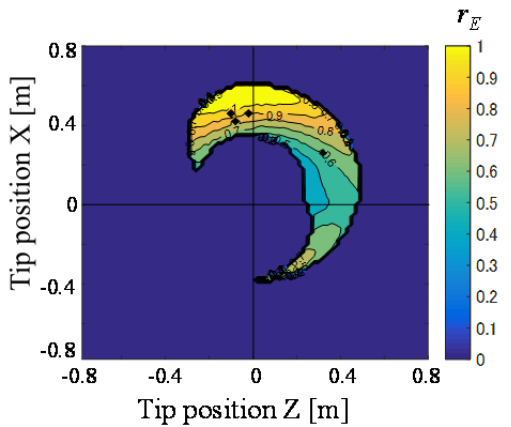
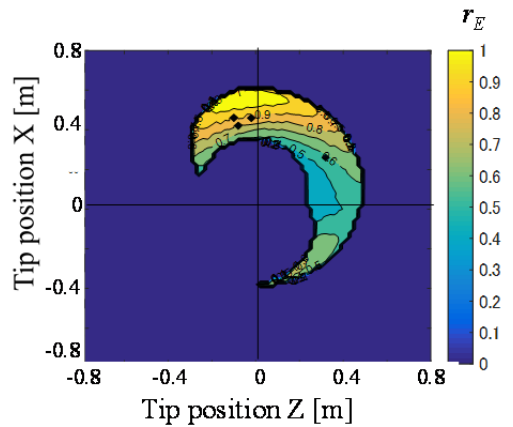


Fig.7.4 Max Velocity (face, Average 0.26m/s)



$\theta_1=0\text{deg}, -210\text{deg}<\theta_2<0\text{deg}, \theta_3=0\text{deg},$   
 $-120\text{deg}<\theta_4<0\text{deg},$   
 $-78\text{deg/s}<\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 78\text{deg/s}$

Fig.7.5 Evaluation result (upper arm)



$\theta_1=0\text{deg}, -210\text{deg}<\theta_2<0\text{deg}, \theta_3=0\text{deg},$   
 $-120\text{deg}<\theta_4<0\text{deg},$   
 $-30\text{deg/s}<\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 30\text{deg/s}$

Fig.7.6 Evaluation result (face)

Table 7.2 Simulation Result

	仮想質量平均	平均接触許容手先速度		接触許容関節速度	
		上腕基準	顔基準	上腕基準	顔基準
モータ関節配置型 アーム (基準)	3.57 kg	0.58 m/s	0.15 m/s	52 deg/s	20 deg/s
ワイヤ駆動アーム	2.29 kg	0.85 m/s	0.26 m/s	78 deg/s	30 deg/s
基準からの比率	64 %	149 %	173 %	156 %	157 %

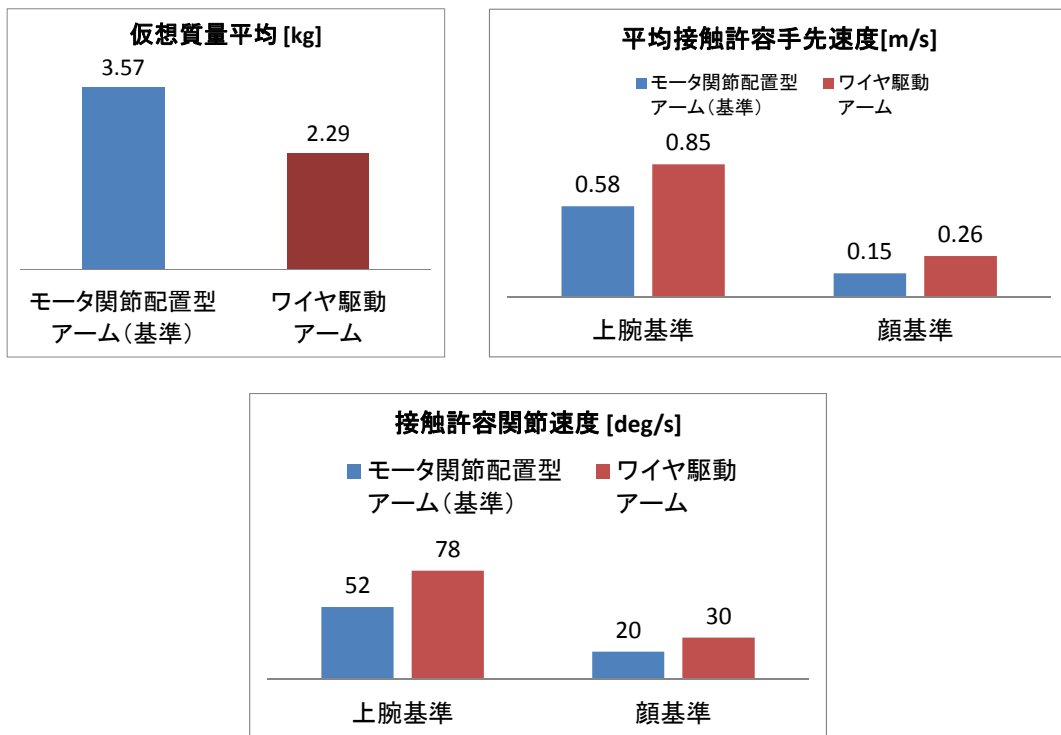


Fig.7.7 Simulation Result

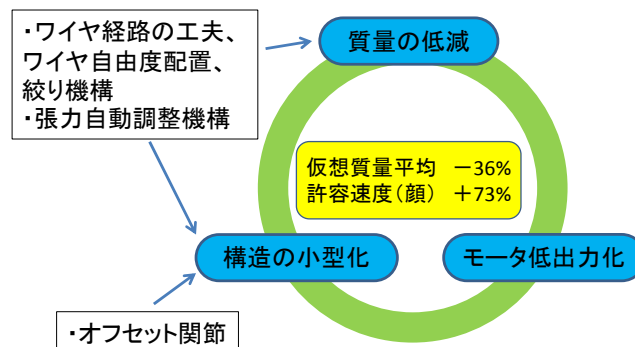


Fig.7.8 Features of the mechanism and its effect



### 7.3 重力補償アームの質量特性

重力補償アームの質量特性の評価は以下の条件において行う。

- ・ 3 軸分の関節を動かすものとして行う。
- ・ Fig.7.4 の Link4 の質量は無視する。
- ・ アーム先端に他のアームと同様の 600g の重量のハンドを取り付けたものとする。
- ・ 力の作用点はハンドの先端とする。作用点の並進速度を考える。

今、座標系を Fig.7.9 のように、DH法で設定し、図のようなリンクパラメータとする。なお、Link2 に関する座標系を  $i=2$ 、Link3 に関する座標系を  $i=2'$  とする、

$i$	$c_i$ [mm]	$\alpha_i$ [deg]	$d_i$ [mm]	$\theta_i$ [deg]
1	0	0	0	$\theta_1$
2	0	90	50	$\theta_2$
2'	0	90	50	$\theta_3$
3	-250	0	0	$\theta_3$

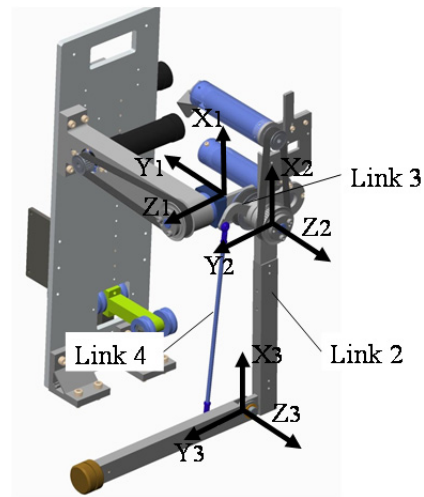


Fig.7.9 Link Parameter

第  $j$  軸の方向から第  $j$  軸の方向への回転行列を  $R_j^i$  とすると、それぞれの回転軸の方向の変換行列は式(7-4)のように表される。

$$R_1^2 = R_z(\theta_1) R_x(-90)$$

$$R_2^3 = R_z(\theta_2) \tag{7-4}$$

よって各軸の方向ベクトル  $\mathbf{a}_i$  をベース座標系で表すと、式(7-5)のようになる。

$$\mathbf{a}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_2 = R_1^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_3 = R_1^2 R_2^3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{7-5}$$

各リンクのベース座標系での慣性テンソル  $I_i$  [kgm<sup>2</sup>] はそれぞれ式(7-6)のように表される。

$$\begin{aligned}
I_1 &= \begin{pmatrix} 0.00007 & 0.00001 & 0.00001 \\ 0.00001 & 0.00008 & 0.00001 \\ 0.00001 & 0.00001 & 0.00010 \end{pmatrix} \\
I_2 &= R_1^{2T} \begin{pmatrix} 0.00088 & 0.00052 & 0.00048 \\ 0.00052 & 0.02507 & 0.00988 \\ 0.00048 & 0.00988 & 0.02456 \end{pmatrix} R_1^2 \\
I_2' &= R_1^{2T} \begin{pmatrix} 0.00266 & 0.00052 & 0.00101 \\ 0.00052 & 0.00103 & 0.00085 \\ 0.00101 & 0.00085 & 0.00283 \end{pmatrix} R_1^2 \\
I_3 &= (R_1^2 R_2^3)^T \begin{pmatrix} 0.02562 & 0.00121 & 0.00652 \\ 0.00121 & 0.00252 & 0.00107 \\ 0.00652 & 0.00107 & 0.02443 \end{pmatrix} R_1^2 R_2^3
\end{aligned} \tag{7-6}$$

アーム全体の慣性テンソルは式(7-7)のように表わされる。

$$\begin{aligned}
H &= A_1^T I_1 A_1 + m_1 B_1^T B_1 + A_2^T I_2 A_2 + m_2 B_2^T B_2 + A_2^T I_2' A_2 \\
&\quad + m_2' B_2'^T B_2' + A_3^T I_3 A_3 + m_3 B_3^T B_3
\end{aligned} \tag{7-7}$$

$$\begin{aligned}
A_1 &= [a_1, 0, 0], \quad A_2 = [a_1, a_2, 0], \quad A_3 = [a_1, a_2, a_3], \\
B_1 &= [b_{11}, 0, 0], \quad B_2 = [b_{12}, b_{22}, 0], \quad B_2' = [b_{12}', b_{22}', 0], \quad B_3 = [b_{13}, b_{23}, b_{33}]
\end{aligned}$$

各軸の座標系で表した重心座標を $l_{gi}$ としこの同次座標表現を、

$$l_{gi}' = \begin{pmatrix} l_{gi} \\ 1 \end{pmatrix} \tag{7-8}$$

とすると、関節軸 $j$ からリンク $i$ の重心までのベクトル $r_{ji}$ の同次座標表現 $r'_{ji}$ は式(7-9)のように表される。

$$\begin{aligned}
r'_{11} &= T_1^0 l_{g1}' \\
r'_{12} &= T_1^0 T_2^1 l_{g2}', \quad r'_{22} = T_1^0 T_2^1 l_{g2}' - T_1^0 T_2^1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
r'_{12'} &= T_1^0 T_2^{1'} l_{g2'}', \quad r'_{22'} = T_1^0 T_2^{1'} l_{g2'}' - T_1^0 T_2^{1'} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
r'_{13} &= T_1^0 T_2^1 T_3^2 l_{g3}', \quad r'_{23} = T_1^0 T_2^1 T_3^2 l_{g3}' - T_1^0 T_2^1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \\
r'_{33} &= T_1^0 T_2^1 T_3^2 l_{g3}' - T_1^0 T_2^1 T_3^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{7-9}$$

よって、式(2-9)からアーム全体の慣性テンソルを求めることができる。次に、ベース座標で表した手先位置を $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{x}$ の同次座標表現を $\mathbf{x}'$ 、第3軸の座標系で表した手先座標を $l_{tip}$ とすると、

$$\mathbf{x}' = T_1^0 T_2^1 T_3^2 \begin{pmatrix} l_{tip} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7-10)$$

式(7-10)よりヤコビ行列  $J_g(\boldsymbol{\theta})$  が求まり、式(2-10)で手先位置に関する一般化慣性楕円体が求まる。これよりアーム手先の接触方向の仮想質量が求まる。Fig.7.10に手先位置における仮想質量最大値の分布を示す。なお、2次元平面（ベース座標系のZ-Y平面に投影）上で傾向を確認するため、アーム姿勢の $\theta_1$ は0とし、 $\theta_2$ と $\theta_3$ を変えて解析を行った。この分布の平均値をとると、2.23kgとなった。また、この分布を見ると、手先位置がアーム基部に近い場合と、遠くにある場合が仮想質量が大きくなっていることがわかる。さらに、許容接触エネルギー内の最大速度の分布をFig.7.11(上腕接触を考慮した場合)、Fig.7.12(顔接触を考慮した場合)に示す。なお、Fig.7.11の最大速度の平均値は0.86m/s、また、Fig.7.12の最大速度の平均値は0.27m/sであり、目標速度の0.25m/s以上を達成している。

次にアームの関節速度で評価する。式(2-5)で表される接触許容エネルギーとの比率 $r_E$ を求めてプロットした結果をFig.7.13、Fig.7.14に示す。Fig.7.13は、上腕接触を基準とした比率であり、Fig.7.14は、顔接触を基準とした比率である。Fig.7.13は、上腕接触を基準として可動範囲にわたって $r_E < 1$ となる関節速度 ( $-98\text{deg/s} < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 98\text{deg/s}$ ) を総当りで求め、この速度条件のもとで $r_E$ をプロットしたものである。また、Fig.7.14は、顔接触を基準として可動範囲にわたって $r_E < 1$ となる関節速度 ( $-40\text{deg/s} < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 40\text{deg/s}$ ) を総当りの的に求め、この速度条件のもとで $r_E$ をプロットしたものである。この分布を見ると、 $\theta_2$ 軸から離れるにしたがってエネルギーは大きくなっている。また、 $\theta_1$ 軸の影響については、図中のエネルギーの等高線が $\theta_1$ 軸位置を長軸とした楕円の一部に近い形状となっており、やはり、 $\theta_1$ 軸から離れるにつれてエネルギーが大きくなっていることがわかる。この関節速度以内で動作させれば、それぞれの接触許容エネルギー以下でアームを駆動できることになる。3章で述べたモータ関節配置型アームと比較した表をTable 7.2に示す。またこれをグラフにしたものをFig.7.15に示す。この結果より、重力補償型アームのほうが、仮想質量を約62%にでき、手先速度は約1.5~1.8倍、関節速度換算で約1.8~2.0度で駆動できることがわかり、質量特性の向上度合がわかる。

Fig.7.16に各機構の効果とそれによる安全性を考慮した特性向上結果の関係を示す。各機構の効果により、質量の低減、モータの低出力化、構造の小型化が図られ、その結果、本節で述べたような安全性を考慮した特性の向上が見られた。代表的なものとして、仮想質量は基準アームと比較して、-38%、顔を考慮した接触許容速度は +80%となっている。

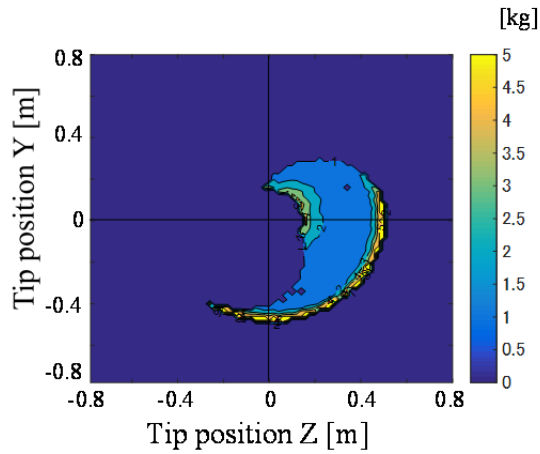


Fig.7.10 Virtual Mass (Average 2.23kg)

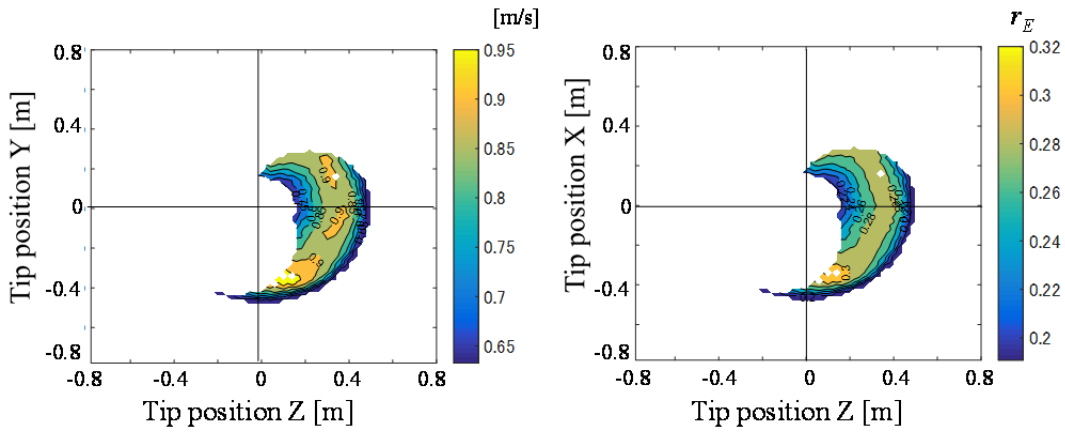
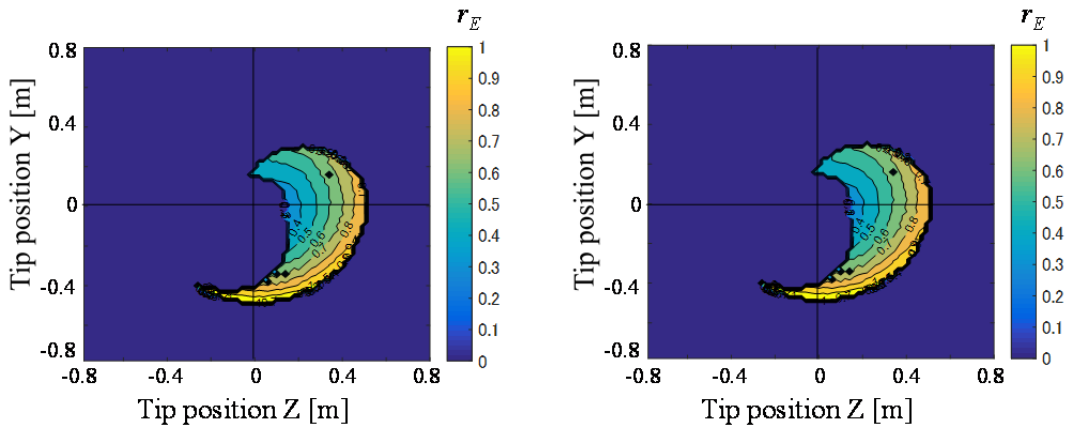


Fig.7.11 Max Velocity (upperarm, Ave.0.85m/s) Fig.7.12 Max Velocity (face, Ave.0.27m/s)



$\theta_1=0\text{deg}, -90\text{deg}<\theta_2<40\text{deg}, -150\text{deg}<\theta_3<-10\text{deg},$   
 $-98\text{deg/s}<\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3 < 98\text{deg/s}$

$\theta_1=0\text{deg}, -90\text{deg}<\theta_2<40\text{deg}, -150\text{deg}<\theta_3<-10\text{deg},$   
 $-40\text{deg/s}<\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3 < 40\text{deg/s}$

Fig.7.13 Evaluation result (upper arm)

Fig.7.14 Evaluation result (face)

Table 7.3 Simulation Result

	仮想質量平均	平均接触許容手先速度		接触許容関節速度	
		上腕基準	顔基準	上腕基準	顔基準
モータ関節配置型 アーム (基準)	3.57 kg	0.58 m/s	0.15 m/s	52 deg/s	20 deg/s
自重補償アーム	2.23 kg	0.85 m/s	0.27 m/s	98 deg/s	40 deg/s
基準からの比率	62 %	148 %	180 %	182 %	200 %

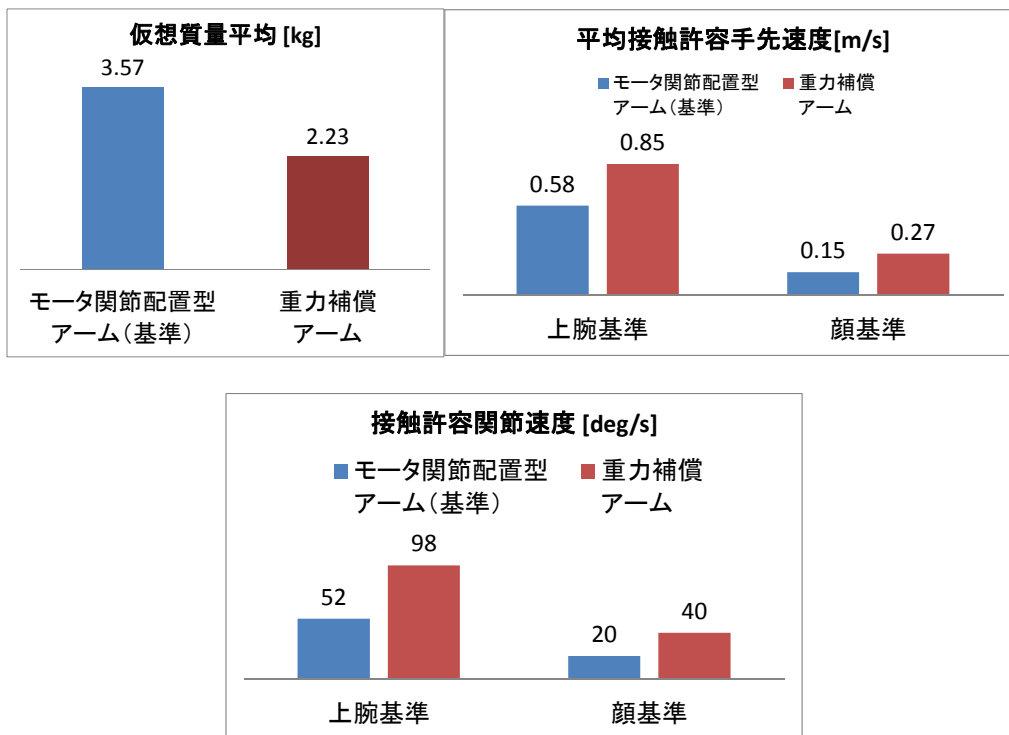


Fig.7.15 Simulation Result

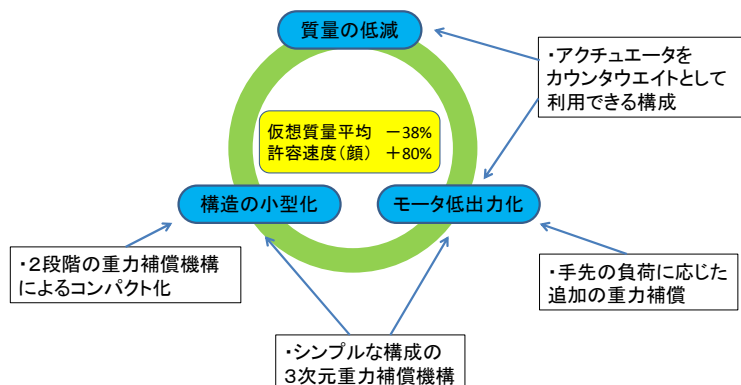


Fig.7.16 Features of the mechanism and its effect

## 7.4 下面支持ハンド搭載アームの質量特性

下面支持ハンド搭載アームの質量特性の評価は以下の条件において行う。

- ・手首のねじり1軸分の関節は固定とする。手先速度への影響が大きい、4軸分の関節を動かすものとして行う。
- ・プレートおよびそれを支えるリンク部はハンド部と一体とした質量特性で扱う
- ・力の作用点はハンドの先端とする。作用点の並進速度を考える。

今、座標系を Fig.7.17 のように、DH法で設定し、図のようなリンクパラメータとする。

i	$c_i$ [mm]	$\alpha_i$ [deg]	$d_i$ [mm]	$\theta_i$ [deg]
1	0	0	0	$\theta_1$
2	0	-90	0	$\theta_2 - 90$
3	190	0	0	$\theta_3$
4	139	0	0	$\theta_4$

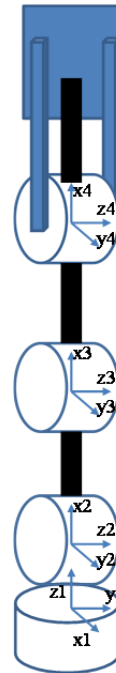


Fig.7.17 Link Parameter

第  $j$  軸の方向から第  $j$  軸の方向への回転行列を  $R_j^i$  とすると、それぞれの回転軸の方向の変換行列は式(7-11)のように表される。

$$\begin{aligned}
 R_1^2 &= R_z(\theta_1) R_x(-90) \\
 R_2^3 &= R_z(\theta_2 + 90) \\
 R_3^4 &= R_z(\theta_3)
 \end{aligned} \tag{7-11}$$

よって各軸の方向ベクトル  $\mathbf{a}_i$  をベース座標系で表すと、式(7-12)のようになる。

$$\mathbf{a}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_2 = R_1^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_3 = R_1^2 R_2^3 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{a}_4 = R_1^2 R_2^3 R_3^4 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{7-12}$$

各リンクのベース座標系での慣性テンソルは  $I_i$  [kgm<sup>2</sup>]それぞれ式(7-22)のように表される。

$$\begin{aligned}
I_1 &= \begin{pmatrix} 0.00854 & 0.00085 & 0.00182 \\ 0.00085 & 0.00238 & 0.00097 \\ 0.00182 & 0.00097 & 0.00743 \end{pmatrix} \\
I_2 &= R_1^2 T \begin{pmatrix} 0.00126 & 0.00043 & 0.00058 \\ 0.00043 & 0.00373 & 0.00072 \\ 0.00058 & 0.00072 & 0.00396 \end{pmatrix} R_1^2 \\
I_3 &= (R_1^2 R_2^3)^T \begin{pmatrix} 0.00102 & 0.00034 & 0.00031 \\ 0.00034 & 0.00187 & 0.00046 \\ 0.00031 & 0.00046 & 0.00174 \end{pmatrix} R_1^2 R_2^3 \\
I_4 &= (R_1^2 R_2^3 R_3^4)^T \begin{pmatrix} 0.00732 & 0.00157 & 0.00132 \\ 0.00157 & 0.03332 & 0.00326 \\ 0.00132 & 0.00326 & 0.02817 \end{pmatrix} R_1^2 R_2^3 R_3^4
\end{aligned} \tag{7-13}$$

関節軸 $j$ からリンク $i$ の重心までの位置ベクトル  $r_{ji}$  は式(3-7)で求められ、7.1節と同様にして手先位置に関する一般化慣性楕円体が求まる。これよりアーム手先の接触方向の仮想質量が求まる。Fig.7.18に手先位置における仮想質量最大値の分布を示す。なお、2次元平面（ベース座標系のZ-X平面）上で傾向を確認するため、アーム姿勢の $\theta_1$ は0とし、 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ を変えて解析を行った。この分布の平均値をとると、3.51kgとなった。またこの分布を見ると、手先位置がアーム基部近傍にある場合と、アーム基部から離れた場所にある場合に、仮想質量が大きくなっていることがわかる。さらに、許容接触エネルギー内での最大速度の分布をFig.7.19(上腕接触を考慮した場合)、Fig.7.20(顔接触を考慮した場合)に示す。なお、Fig.7.19の最大速度の平均値は、0.62m/s、Fig.7.20の最大速度の平均値は、0.16m/sであった。以上より求めたアーム接触点の接触方向の速度と仮想質量から、式(2-5)で表される接触許容エネルギーとの比率 $r_E$ を求めてプロットした結果をFig.7.21、Fig.7.22に示す。なお、2次元平面（ベース座標系のZ-X平面）上で傾向を確認するため、アーム姿勢の $\theta_1$ は0とし、 $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ を変えて解析を行った。Fig.7.21は、上腕接触を基準とした比率あり、Fig.7.22は、顔接触を基準とした比率である。Fig.7.21は、上腕接触を基準として可動範囲にわたって $r_E < 1$ となる関節速度（ $-56\text{deg/s} < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 56\text{deg/s}$ ）を総当りで求め、この速度条件のもとで $r_E$ をプロットしたものである。また、Fig.7.22は、顔接触を基準として可動範囲にわたって $r_E < 1$ となる関節速度（ $-20\text{g/s} < \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dot{\theta}_4 < 20\text{g/s}$ ）を総当りで求め、この速度条件のもとで $r_E$ をプロットしたものである。この分布を見ると、 $\theta_2$ 軸から離れるにしたがってエネルギーは大きくなっている。また、 $\theta_1$ 軸の影響については、図中のエネルギーの等高線が $\theta_1$ 軸付近を長軸とした楕円の一部に近い形状となっており、やはり、 $\theta_1$ 軸から離れるにつれてエネルギーが大きくなっていることがわかる。この関節速度以内で動作させれば、それぞれの接触許容エネルギー以下でアームを駆動できることになる。3章で述べたモータ関節配置型アームと比較した表をTable 7.3に示す。またこれをグラフにしたものをFig.7.23に示す。この結果より、下面支持機構アームとモータ関節配置型アームはほぼ質量特性はそれほど変わらないことがわかる。ただし、いろいろな形状の食器が持てるように機構を工夫しており、それにも関わらず同程度の質量特性となっているのは価値があると考えられる。

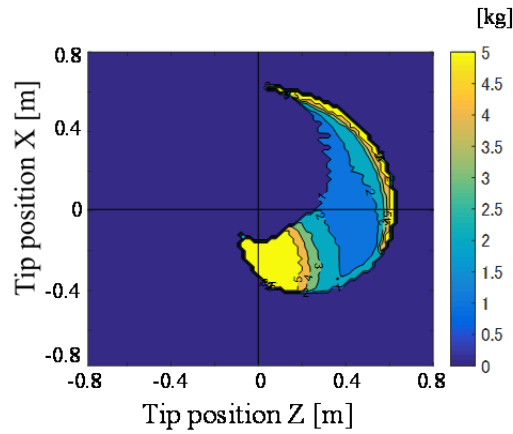


Fig.7.18 Virtual Mass (Average 3.51kg)

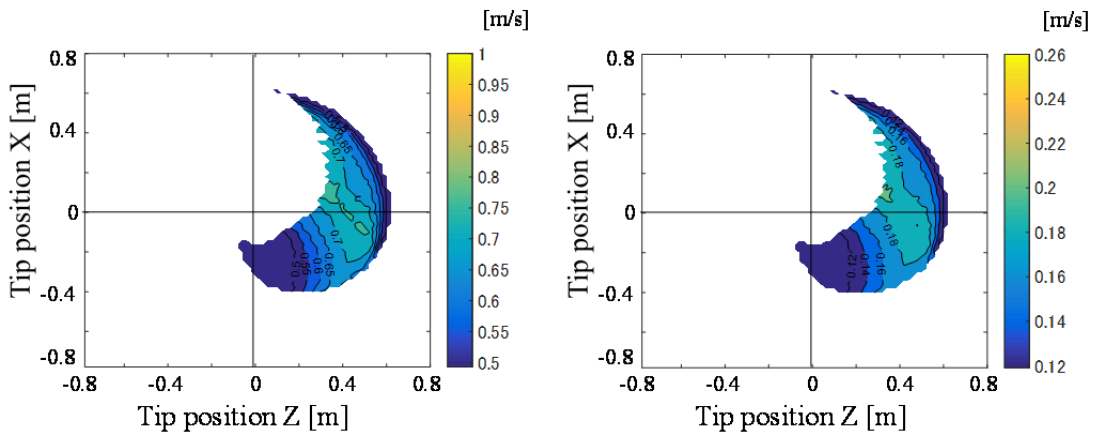


Fig.7.19 Max Velocity (upperarm, Ave.0.62m/s) Fig.7.20 Max Velocity (face, Ave.0.16m/s)

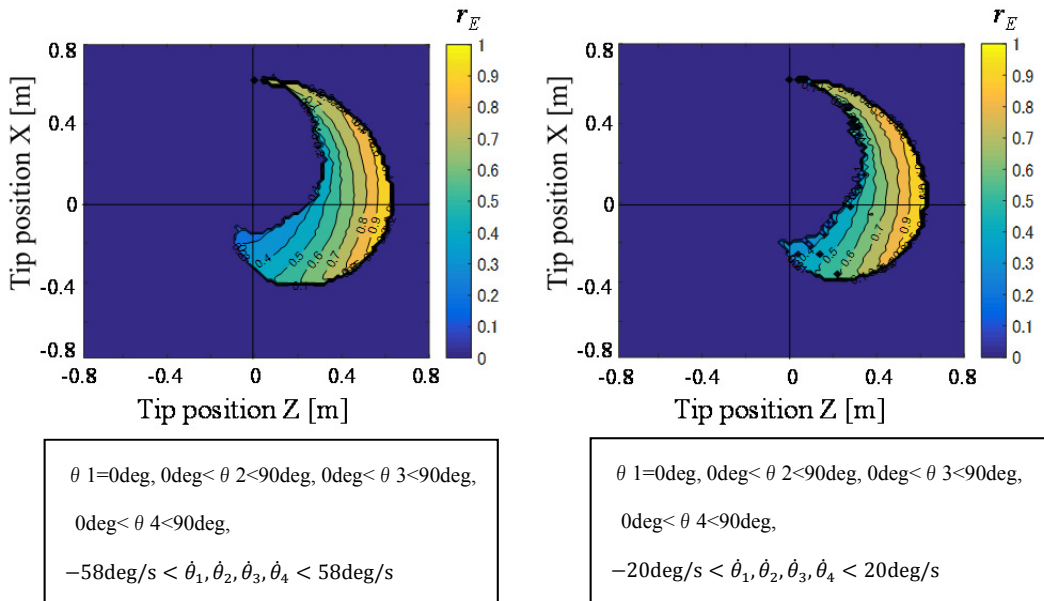


Fig.7.21 Evaluation result (upper arm)

Fig.7.22 Evaluation result (face)



Table 7.4 Simulation Result

	仮想質量平均	平均接触許容手先速度		接触許容関節速度	
		上腕基準	顔基準	上腕基準	顔基準
モータ関節配置型 アーム (基準)	3.57 kg	0.58 m/s	0.15 m/s	52 deg/s	20 deg/s
下面支持ハンド 搭載アーム	3.51 kg	0.62 m/s	0.16 m/s	56 deg/s	20 deg/s
基準からの比率	98 %	107 %	107 %	108 %	100 %

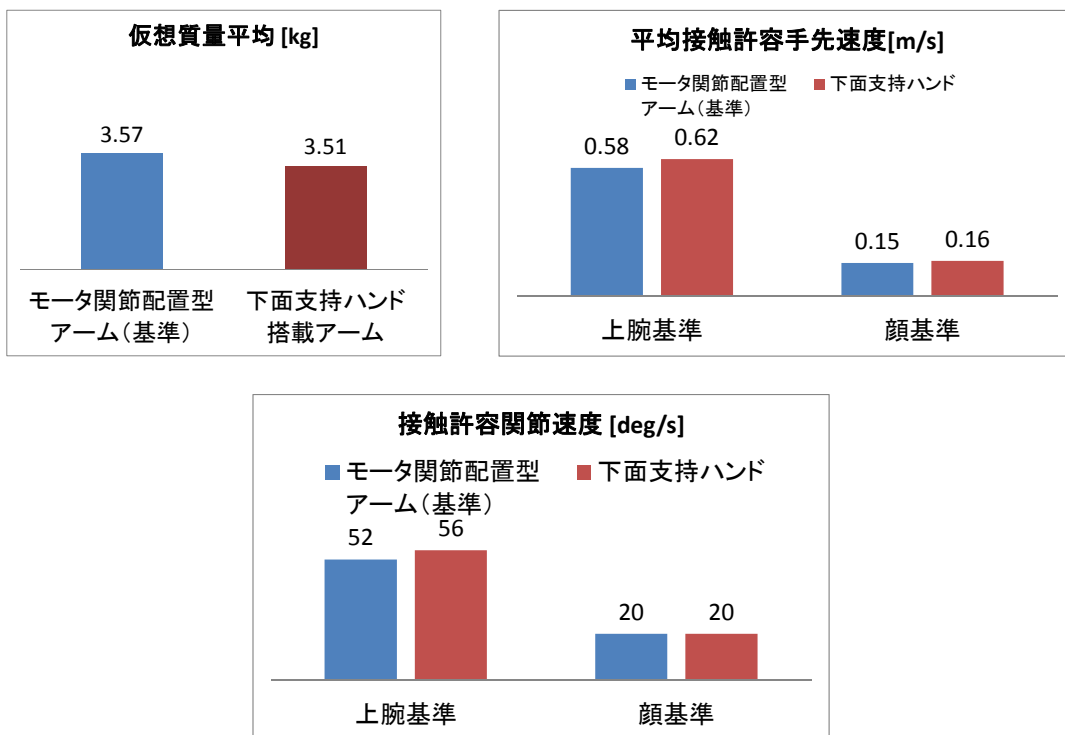


Fig.7.23 Simulation Result

Fig.7.24に各機構の効果とそれによる安全性を考慮した特性向上結果の関係を示す. 各機構の効果により, 質量の低減, モータの低出力化, 構造の小型化が図られ, その結果, 本節で述べたような安全性を考慮した特性については基準アームと比較して, 仮想質量は-2%, 顔を考慮した接触許容速度は+7%とあまり変わらなかった. ただし, 機構を追加にも関わらず同程度の質量特性となっているのは価値があると考えられる.

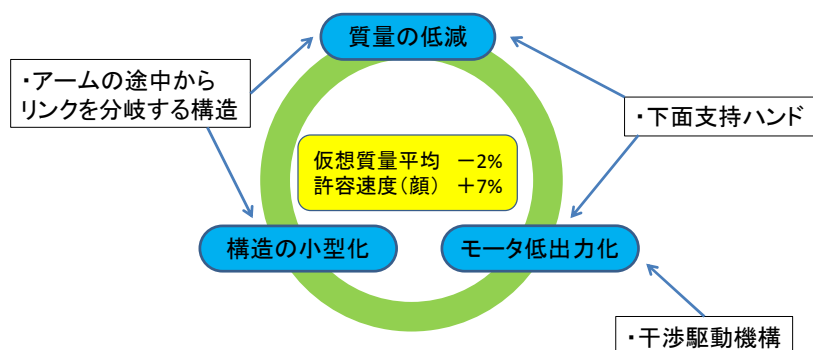


Fig.7.24 Features of the mechanism and its effect

## 7.5 各アームの質量特性比較

本章では、第4章から第6章まで述べてきたワイヤ駆動アーム、重力補償アーム、下面支持機構搭載アームの3種類の新しいアーム機構の安全に関する質量特性を2章の方法で評価し、可動範囲における仮想質量の分布、接触時の許容エネルギー以下になる手先速度の分布、関節速度基準での接触時の伝達エネルギーの分布について検証した。すべての結果をまとめた表をTable 7.4に示す。またこれをグラフにしたものをFig.7.25に示す。この結果より、第3章で述べた従来のモータ関節配置型アームと比較して、ワイヤ駆動アームと重力補償アームでは仮想質量が小さくなり、手先最大速度、関節速度は大きくなることを確認し、質量特性の向上の度合いが分かった。特に、目標としていた顔接触基準の平均速度0.25m/s以上を達成することができている。下面支持機構搭載アームについては、モータ関節配置型アームとほぼ同じ仮想質量、最大速度であることを確認し、いろいろな形状の食器が持てるように機構を工夫しており、それにも関わらず同程度の質量特性となっているのは価値があると考えられる。

このように提案した安全性に関する質量特性の評価は、アームの質量分布さえ分かれば様々な新しいアーム機構に適用でき、汎用性が高い手法である。

Table 7.5 Simulation Result of All Arms

	仮想質量平均	平均接触許容手先速度		接触許容関節速度	
		上腕基準	顔基準	上腕基準	顔基準
モータ関節配置型アーム	3.57 kg	0.58 m/s	0.15 m/s	52 deg/s	20 deg/s
ワイヤ駆動アーム	2.29 kg (64%)	0.85 m/s (149%)	0.26 m/s (173%)	78 deg/s (156%)	30 deg/s (157%)
自重補償アーム	2.23 kg (62%)	0.86 m/s (148%)	0.27 m/s (180%)	98 deg/s (182%)	40 deg/s (200%)
下面支持ハンド搭載アーム	3.51 kg (98%)	0.62m/s (107%)	0.16 m/s (107%)	56 deg/s (108%)	20 deg/s (100%)

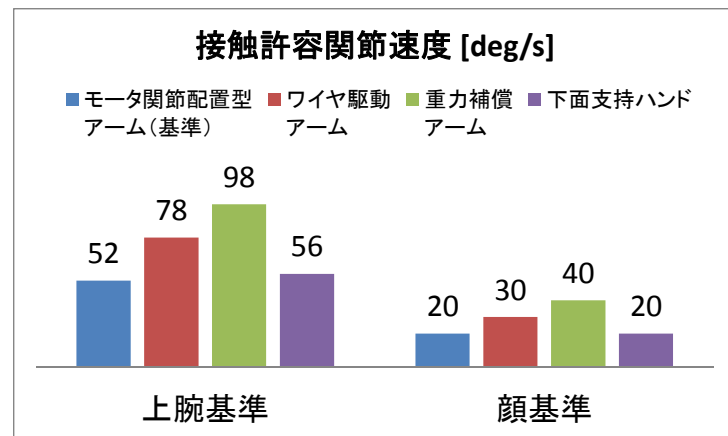
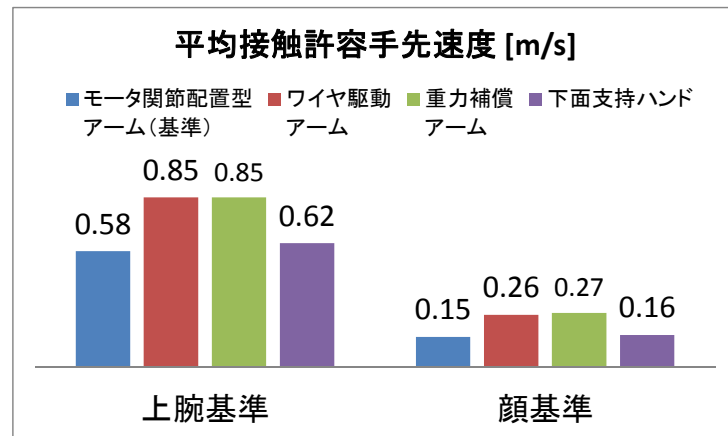
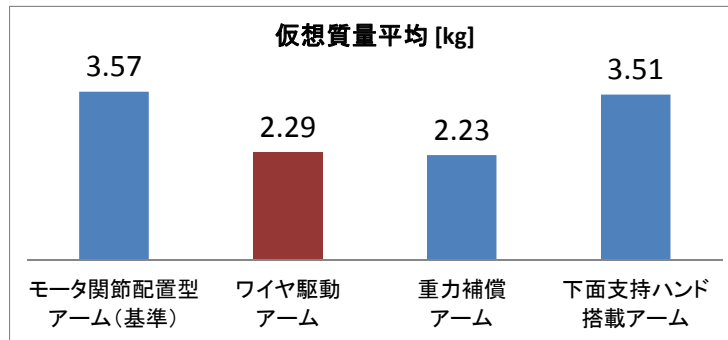


Fig.7.25 Simulation Result of All Arms

## 第8章 結論と今後の展望

### 8.1 結論

本研究では、生活空間で用いることのできるアームを実用化するための機構要素の提案および、それらを搭載したアームの安全性に関する質量特性を統一的に評価できる手法の提案を行った。機構要素の提案においては、機構に限らず様々な対策を統合的に行っていく必要はあるが、本研究ではアーム基本設計に関わる部分が比較的大きい、質量系の軽減アクチュエータの低出力化および構造の小型化を目的とした機構を提案し、評価を行なった。さらに、サービスロボットへの適用を考えて、実際に我々が開発した生活空間内で動く移動ロボットにも搭載できるアーム、机の上等にある物を持ち上げる、置くことのできるアームをコンセプトとした機構とした。アームの安全性評価手法の提案においては、安全機構をアームに取り込んでいき、またロボットの特性を的確に把握することを目的とし、痛覚耐性に基づく接触許容エネルギー基準を拡張して様々な機構、自由度のアームに対応できるように質量特性を求めていく手法とした。以下、それぞれの章の内容の詳細についてまとめる。

第2章ではロボットアーム機構の安全に関する評価手法を提案するため、ロボットアームの安全に関する国際規格の動向を整理し、ISO/TS15066で提案されている手法を応用した接触エネルギーの評価手法を提案した。これは、アームの質量特性を元に接触点における仮想質量を算出し、接触部位を考慮した換算質量に変換、接触伝達エネルギーを求め、各部位毎の許容エネルギーを超えるかどうかを基準とするものである。アーム手先位置による仮想質量の分布から、接触時の危険度の分布がわかり、その位置で出せる手先最大速度も算出できる。さらに、関節速度と伝達エネルギーの関係も求めることができる。

第3章ではアームの安全に関する質量特性の基準とし、新規アーム機構提案のための基準とする、モータ関節配置型アームの開発および評価について述べた。このアームはモータを各関節に配置した標準的なタイプのアームであり、家庭内での軽作業実現のための移動ロボット搭載用アームである。このアームの概要について述べ、機能および2章で述べた質量特性の評価を行い、人の傍でピックアンドプレイス作業を行うための問題点を定量的に把握した。これをもとに次章以降の新規アーム機構提案の設計方針を策定した。

第4章では、人間共存ロボットのための軽量ワイヤ駆動アーム開発における、機構構成、ワイヤ張力自動調整機構および、トルク補償制御について述べた。アクチュエータを基部

に配置し、ワイヤ経路の工夫、独自のテンショナー機構等の独自機構による、質量の低減と構造の小型化を実現し、さらに、オフセット関節によるリンク長減による構造の小型化を独自の機構で実現した。特に、モータの近くに配置でき、アクチュエータを必要としない、ワイヤ張力自動調整機構を提案し、実験によりワイヤの張力を自動的に調整できることを確認した。これにより、テンショナーの小型化および、ワイヤのメンテナンス性の向上を実現した。

第5章では、3次元重力補償機構の原理、これを用いたの軽量安全アーム設計試作、評価について述べた。本重力補償機構はパンタグラフ機構を用い、カウンタウエイトとして関節駆動アクチュエータを用いることで、全体の質量を小さくできる。さらに、パンタグラフ機構全体を根元で回転させ、モーメントを釣り合わせるようにカウンタウエイトを配置することで、3次元の重力補償を実現できる。これを実現するためのリンク長や重心位置等の関係を導出した。また、ワイヤを用いて補償力を付加する機構を構成することによって、アーム全体をできるだけコンパクトになるようにした。設計製作したアームの関節トルクシミュレーションから、従来の重力補償なしのアームに対して15%から25%の関節トルクでアームを構成できることを確認した。また、関節トルク計測実験を行い、シミュレーション結果とほぼ同程度の値および傾向を示しており、自重補償機構の効果およびシミュレーション方法、結果の妥当性が確認できた。さらに、補償力調整機構により、手先負荷に応じた補償力制御を行うことによって、各関節に必要なトルクを減らし、関節駆動モータの小型化が実現できることが分かった。

第6章では、ハンド機構に着目し、食器類を安定把持することのできるハンド機構、およびアームシステムの設計について述べた。把持対象の下に板を滑り込ませる本機構の特徴により、簡易な機構および制御で食器として用いる様々な形状の物体を安定に把持できることを解析および実験により確認した。さらに、大きなアクチュエータを用いることなく、また、モータをアームの根元に配置した干渉駆動機構の採用により、所望の可搬重量を実現する食器ハンドリングシステムの設計試作を行い、把持実験から本機構の有効性を確認した。

また、第7章ではまず、第4章から第6章で提案したアームの機構と安全性に関する機構的対策（質量の低減、モータ低出力化、構造の小型化）についての評価をまとめ、ワイヤ駆動アームは、可動部質量-70%を達成し、質量の低減効果が最大であり、重力補償アームは、静止時に必要な最大トルク-90%を達成し、モータの低出力化効果が最大であった。下面支持ハンド搭載アームについては、トレイなどの大型把持対象物を把持するために双腕化せずに単腕での把持を可能としたことにより、構造の小型化の効果があつた。

さらに、各アーム機構の安全に関する質量特性を2章の方法で評価し、可動範囲における接触時の伝達エネルギーの分布および安全な速度について検証した。そして、Table 7.4で示したように、第3章で述べた従来のモータ関節配置型アームと比較して、ワイヤ駆動アームでは顔基準の接触許容速度が速度約1.7倍となり、目標である、0.25 m/sを上回る速

度とすることができた。また、重力補償アームでは顔基準の接触許容速度が速度約 1.7 倍となり、目標である、0.25 m/s を上回る速度とすることができた。下面支持機構搭載アームについては、従来のモータ関節配置型アームとほぼ同じ仮想質量、接触許容速度速度であることを確認した。しかし様々な形状の食器が持てるように機構を工夫しており、それにも関わらず同程度の質量特性となっているのは価値があると考えられる。

このように提案した安全性に関する質量特性の評価は、質量分布さえ分かれば様々な新しいアーム機構に適用でき、汎用性が高い手法である。

## 8.2 今後の課題と展望

今後の課題としては、本評価手法は、質量特性に注目しているが、接触面積や接触面の粘弾性係数も取り込むことが考えられる。つまり、表面形状から接触面積に関するパラメータを算出し、さらに、接触面の材質から粘弾性係数に関するパラメータを算出し、接触伝達エネルギーを求めるために利用する。また、アーム手先以外でも例えば、「肘」にあたる部分など、アーム全体を評価できるように拡張していく必要がある。さらには、できるだけ接触伝達エネルギーが低い可動領域でアームを動かしたり、接触伝達エネルギーが高い可動範囲では速度を落とすなどの軌道制御の組込みが考えられる。

また、今回の解析は概略の傾向を把握するため、2次元平面にあるアーム姿勢で行ったため、より詳細な傾向を把握する場合は3次元のアーム姿勢での仮想質量の解析を行う必要がある。

さらに、アームを移動ロボットに搭載した場合のロボット全体の系で考えた場合の仮想質量や接触許容速度速度を算出することにより、より多くのロボットに適用できる。

## 研究業績

### ○査読付論文

- [1] 中本秀一, 大賀淳一郎, 小川秀樹, 松日楽信人, 人と共存するロボットのためのワイヤ駆動アームの開発, 設計工学 Vol.50, No.6, pp.302-309, 2015
- [2] 中本秀一, 小川秀樹, 松日楽信人, 広瀬茂男, 食器類ハンドリングのための下面支持ハンドの開発 (コンセプト提案とアームシステムへの適用設計), 日本機械学会論文集 (C編) 79 巻 80 号 pp.274-284, 2013
- [3] 中本秀一, 松日楽信人, 桑原裕之, 廣瀬茂男, 3次元自重補償機構を備えたパンタグラフ型ロボットアームの開発, 日本機械学会論文集 Vol.83, No.851, 2017

### ○国際会議(査読付)

- [1] Hideichi Nakamoto, Shigeo Hirose, Development of Under-Supporting Extension Hand (new concept of the hand for stable tableware handling), Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics 2010 (AIM2010), pp.1128-1133
- [2] Hideichi Nakamoto, Nobuto Matsuhira, Development of an Arm for Collaborative Robot Equipped with Gravity Compensation Mechanism According to Payload, Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics 2017 (AIM2017), pp.40-45
- [3] Hideichi Nakamoto, Nobuto Matsuhira, Safety Evaluation Method of Robot Arm Considering Energy of Contact, Proceedings of IEEE International Conference on Advanced Robotics 2017 (ICAR2017), pp.438-443

### ○口頭発表

- [1] 中本 秀一, 大賀 淳一郎, 西山 学, 香月 理恵, 吉見 卓, 胴体直動機構およびオフセット肩関節を有する生活空間内作業ロボットの開発, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 2008, 3E1-06
- [2] 大賀 淳一郎, 中本 秀一, 吉見 卓, 小川 秀樹, 松日楽 信人, 軽量ワイヤ駆動アームにおける機構干渉行列を用いた非干渉化制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2008 2A1-H02

[3]中本 秀一, 大賀 淳一郎, 吉見 卓, 松日楽 信人, 人間共存ロボットのための軽量ワイヤ駆動アームの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2007, 1A1-O02



## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、多くの皆さまにご指導及びご協力いただきましたことに心より感謝申し上げます。

特に、主査の芝浦工業大学松日楽信人教授には、教授の東芝在籍時代から長い期間にわたり研究の機会をいただき、また博士号取得にあたって、ずっと後押しいただき、ひとかたならぬご指導を賜りました。元来の遅筆により、本論文をまとめるのに長い年月がかかってしまったことをお詫び申し上げます。本当にありがとうございました。

副査の吉見卓教授にも教授の東芝在籍時代から研究の機会をいただき、本論文についてもご助言いただきました。吉見教授が40歳までには博士号を取ることを目標とされていたというのを聞き、私も何となくそれが目標になっていました。結局今回の博士号取得は40歳を1ヶ月だけオーバーしてしまいましたが、良いモチベーションでした。

また、副査の島田明教授、内村裕教授、東京工業大学遠藤玄准教授には、本論文をまとめるにあたって、様々なご助言をいただきました。発散しがちであった内容のまとめ方を的確にご助言いただき、何とかここまでまとめることができました。また理論の抜けや論文の体裁なども細かく見ていただき、完成度を上げることができました。感謝申し上げます。

広瀬茂男東工大名誉教授には大学院修士時代からご指導いただき、東芝入社後も共同研究などで多くのご助言を賜りましたことに御礼申し上げます。本来ならば先生のもとで博士号を取るべきところ、日頃からの怠惰な性格もあって、退官されるまでに間に合わなかったことは慚愧のいたりです。

株式会社東芝研究開発センター機械システムラボラトリ廣畑賢治室長、小川昭人主任研究員、東芝インフラシステムズ株式会社山本健彦統括技師長、青柳利明 GPM には、会社の業務と並行した博士号取得の許可を頂き、フォローいただきました。ありがとうございました。

株式会社東芝研究開発センター機械システムラボラトリ小川秀樹フェロー、大明準治氏、大賀淳一郎研究主務には、アーム開発を手伝っていただき、また、論文の内容についてのご相談にも乗っていただきました。ありがとうございました。

株式会社東芝研究開発センター機械システムラボラトリロボット、メカトログループの皆様には、ロボットシステムを動かすのにご協力いただき、一緒に楽しく研究を進めることができました。ありがとうございました。

株式会社東芝研究開発センター機器試作部の皆様にはアームの設計，組立，配線に多大なご協力いただき感謝しております。構想設計を実際に形にし，動かすところまでできたのはひとえに皆様のおかげです。

最後になりましたが，これまで温かい目で見守ってご支援下さった，この場書ききれない多くのご協力いただいた皆様に深い感謝の意を表して謝辞といたします。

## 参考文献

- [1-1] 田邊博史, 藤原忠弘, 宮野善弘, 嶋田輝夫, 平井正之, 中畑光明, 小型家電製品のセル生産に最適な本質安全が組み込まれた双腕ロボットの開発, 川田技報 Vol.29, 2009
- [1-2] 森岡昌宏, 人間・ロボット協調型セル生産組立システムの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.27 No.10, pp.1088-1091, 2009
- [1-3] 加藤一郎, リリスボットー生活支援ロボットーの構想, 日本ロボット学会誌, Vol. 11 No. 5 pp.614-617, 1993
- [1-4] K. Kawamura, M. Iskarous, Trends in service robots for the disabled and the elderly, Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems '94 pp.1647-1654, 1994
- [1-5] 人間共存型ロボット研究専門委員会, 人間共存型ロボットシステムにおける技術課題, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3, pp.288-294, 1998
- [1-6] 杉本 旭, 池田 博康, 産業用ロボットの安全性と高信頼性技術, 日本ロボット学会誌 Vol. 14 No. 6 pp.788-791, 1996
- [1-7] ABB Yumi <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi>
- [1-8] KUKA LBR iiwa  
<https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>
- [1-9] ユニバーサルロボット 協働ロボット : URシリーズ  
<https://www.universal-robots.com/ja/>
- [1-10] ライフロボティクス 協働ロボット : CORO  
<https://liferobotics.jp/product/index.html>
- [1-11] ファナック 協働ロボット : CR-35iA  
[http://www.fanuc.co.jp/ja/product/new\\_product/2015/201503\\_kyoudourobot.html](http://www.fanuc.co.jp/ja/product/new_product/2015/201503_kyoudourobot.html)
- [1-12] 川崎重工業 協働ロボット : duAro (デュアロ)  
<https://robotics.kawasaki.com/ja1/products/robots/dual-arm-scara/duAro1/>
- [1-13] 横井 一仁, 小森谷 清, 谷江 和雄, 今村 信昭, 河合 健, 吾郷 健二, 7自由度ワイヤ干渉駆動アームの機構と制御, 日本機械学会論文集 C編 Vol. 59 No. 558 pp.458-465, 1993

- [1-14] Zinn, M., Khatib, O. and Roth, B. :A New Actuation Approach for Human Friendly Robot Design, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 249-254, 2004
- [1-15] 岡崎 安直, 山本 正樹, 小松 真弓, 津坂 優子, 足達 勇治, 空気圧人工筋による人に対して安全な多自由度ロボットアーム技術の開発. 日本ロボット学会誌 Vol.28 No. 3 pp.302-310, 2010
- [1-16] Development of a hyper-redundant multijoint manipulator for maintenance of nuclear reactors, *International Journal of Advanced Robotics*.9, 1995
- [1-17] 樋口峰夫, 人間共存型作業補助アーム PAS-Arm の開発 (メカニズム・CVT の設計と機能検証システム), 日本機械学会論文集 C 編 Vol.75 No.749 pp.104-112, 2009
- [1-18] 金 亨俊, 山川 宏, 初期設計段階における多関節ロボットアームの最適な関節数, リンク長, 軌道に関する研究, 計測自動制御学会論文集 Vol. 51 No. 4 pp. 240-250, 2015
- [1-19] 森田 寿郎, 菅野 重樹, メカニカルソフトネスとコンプライアンス調節, 日本ロボット学会誌 17(6), pp.790-794, 1999
- [1-20] 松本吉央, 田中秀幸, 吉川雅博, 脇田優仁, 国際生活機能分類(ICF)を用いた生活支援ロボットの開発, 情報処理, Vol.54, No.8, pp.799-804, 2013.
- [1-21] Tsuneo Yoshikawa, Manipulability of Robotic Mechanisms, *The International Journal of Robotics Research*, Vol.4, No.2, pp.3-9, 1985
- [1-22] 吉川 恒夫, ロボット制御基礎論, コロナ社
- [1-23] T. Yoshikawa, Dynamic manipulability of robot manipulators, *Journal of Robotics Systems*, Vpl.2, No.1, pp.113-124, 1985
- [1-24] 倉爪亮, 長谷川勉 シリアルリンクマニピュレータのインピーダンスマッチング, 日本ロボット学会誌 Vol. 23 No. 2, pp.179, 2005
- [1-25] 浅田 春比古, ロボットアーム動特性の幾何学的解析法, 計測自動制御学会論文集 19(6), 500-505, 1983
- [1-26] 土肥建純, 医療福祉ロボットの種類とその安全, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 1996 予稿集, pp.1181-1182, 1995
- [1-27] 斎藤之男他, 介護用ロボットの安全操作に関する研究, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 1996 予稿集, pp.1177-1180, 1996
- [1-28] 生田 幸士, 野方 誠, 福祉ロボットの安全性に関する統一的评价法の提案 —危険性の定量化による安全設計対策の評価—, 日本ロボット学会誌 17(3), 363-370, 1999
- [1-29] 山田 陽滋, 吹田 和嗣, 池田 博康, 杉本 旭, 三浦 洋憲, 中村 尚範, ヒト・ロボット共存のための人間工学実験に基づく痛覚レベルの人体耐性値の解明, 日本機械学会論文集. C 編 63(612), 2814-2819, 1997

- [1-30] 山田 陽滋, 吹田 和嗣, 今井 孝二, 池田 博康, 痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出および停止機能を有するロボットシステム, 日本機械学会論文集. C 編 63(614), 3552-3557, 1997
- [1-31] 池田博康, 斎藤剛, 人間協調型ロボットの本質的安全設計手法と安全設計指標の提案, 産業安全研究所特別研究報告 NIIS-SRR 33 号, pp.5-13, 2005
- [2-1] 浅田 春比古, 小川 一男, 逆慣性行列を用いたロボットアームの動特性解析とその作業計画ならびにエンドエフェクタ設計への応用, 計測自動制御学会論文集 23(9), 961-968, 1987
- [2-2] 永田 和之, 小笠原 司, 小俣 透, 多関節ロボットの柔軟な突き当てのための最適速度ベクトル計測自動制御学会論文集 26(4), 435-442, 1990
- [3-1] Young Sang Choi, Travis Deyle, Tiffany Chen, Jonathan D. Glass, Charles C. Kemp, A list of household objects for robotic retrieval prioritized by people with ALS, Proc. of IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics 2009 (ICORR 2009), pp.510-517, 2009
- [4-1] Mason, M. T. and Salisbury, J. K. : RobotHands and the Mechanics of Manipulation, MIT Press, ISBN:0-262-13205-2 , 1985
- [4-2] Sugahara, Y., Noha, K., Kosuge, K., Ooga, J., Nakamoto, H. and Yoshimi, T. : Experimental Study on Manipulator Design for Low Collision Impact Force, Proceedings of the 2009 IEEE/ASME Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 899-904, 2009
- [4-3] Ma, S., Yoshida, H., Yamazaki, T. and Hirose, S. : Development of Coupled Tendon-driven Multijoint Manipulator, Proceedings of the 1991 IEEE/rsj international conference on intelligent robots and systems, 725, 1991
- [4-4] Tsusaka, Y. and Ota, Y. : Wire-Driven Bipedal Robot, Proceedings of the 2006 IEEE/rsj international conference on intelligent robots and systems, 3958, 2006
- [4-5] Hirose, S. and Sato, M. : Coupled Drive of the Multi-DOF Robot, Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automationn, 1610, 1989
- [4-6] Mizuguchi, T., Fusejima, N., Ohyama, T., Kondo, R. and Ma, S., : Control of Wire-driven Multi-Joint Robot, Proc. of SICE Annual Conf., 3168 , 2002
- [4-7] Arikawa, K. and Hirose, S. : Development of Quadruped Walking Robot TITAN- VIII, Proceedings of the 1996 IEEE/rsj international conference on intelligent robots and systems, 208, 1996

- [4-8] Yuan, J., Zhang, W., Tao, J., Wan, Z., and Tang, Z. : Research on Novel Wire Driving Robot Manipulator for Local Industrial Production Line, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 3925, 2007
- [4-9] 北野智士, 広瀬茂男, 遠藤玄, 新素材ワイヤを用いた駆動機構による脚機構設計, 日本ロボット学会学術講演会 2013 予稿集, AC3I1-3, 2013
- [4-10] Fung, Y. C. : Foundatuons of Solid Mechanics, Prentice-Hall, Inc., 95, 1965
- [5-1] Hirose, S., Ishii, T., Haishi, A., Float ArmV; Hyper-Redundant Manipulator With Wire-Driven Weight-Compensation Mechanism, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), pp.368-373, 2003
- [5-2]遠藤玄,山田浩也,矢島明,尾形勝,広瀬茂男,非円形プーリー—バネ系による自重補償機構と4節平行リンク型アームへの適用,日本ロボット学会誌,Vol28,No.1, pp.77-84, 2010
- [5-3]山田泰行, 森田寿郎, 揺動スライダクランク機構を用いた機構的自重補償装置, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.767,No.67, pp.1797-1803, 2010
- [5-4]武居直行, 省エネ・安全のための重力補償機構, 日本ロボット学会誌, No1.29, No.6, pp.508-511, 2011
- [5-5]Tojo, Y., Debenest, P., Fukushima, E., Hirose, S., Robotic System for Humanitarian Demining, Development of Weight-Compensated Pantograph Manipulator, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), pp.2025-2030, 2004
- [5-6]Morita,T., Kuribara,E., Shiozawa, Y. and Sugano, S., A novel mechanism design for gravity compensation in three dimensional space, Proc. of the 2003IEEE ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.163-168, 2013
- [5-7]Changhyun Cho, Woosub Lee, Sungchul Kang, “Static balancing of a manipulator with hemispherical work space”, Proc. of 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics pp.1269 – 1274, 2010
- [5-8]N. Takesue, T. Ikematsu, H. Murayama and H.Fujimoto, Design and Prototype of Variable Gravity Compensation Mechanism (VGCM), Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.2, pp.249-257, 2011
- [6-1] M.Mason and K.Salisbury, “Robot Hands and Mechanics of Manipulation”, MIT Press, 1986
- [6-2] S.C. Jacobsen, E.K.Iversen, D.E.Knutti, R.T.Johnson and K.B.Biggers, “Design of the Utah/M.I.T. dextrous hand”, Proc. IEEE intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.1520-1532, 1986
- [6-3] J.Butterfass, M.Grebenstein, H.Liu and G.Hirzinger, "DLR-Hand II: Next Generation of a Dexterous Robot Hand", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.109-114, 2001

- [6-4] H.Kawasaki, H.Shimomura, and Y.Shimizu, "Educa-tional-Industrial Complex Development of Anthropomorphic Robot Hand 'Gifu Hand,'" Advanced Robotics, Vol.15, No.3, pp.1357-13613, 2001
- [6-5] Hiroyuki Nakai, Minori Yamataka, Toru Kuga, Sachiko Kuge, Hiroyuki Tadano, Hidenobu Nakanishi, Masanobu Furukawa and Hideshi Ohtsuka, "Development of Dual-Arm Robot with Multi-Fingered Hands", Proc. of IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN06), pp.208-213, 2006
- [6-6] Junya Fujimoto, Ikuo Mizuuchi, Yoshinao Sodeyama, Kunihiro Yamamoto, Naoya Muramatsu, Shigeki Ohta, Toshinori Hirose, Kazuo Hongo, Kei Okada and Masayuki Inaba, "Picking up Dishes based on Active Groping with Multisensory Robot Hand", Proc. of The 18th IEEE Int. Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp.220-225, 2009
- [6-7] Hiroyasu IWATA, Shigeki SUGANO, "Design of An-thropomorphic Dexterous Hand with Passive Joints and Sensitive Soft Skins", Proc. of IEEE/SICE Int. Symposium on System Integration, pp.129 – 134, 2009
- [6-8] K. Kosuge, J. Lee, J.Ichinose and Y. Hirata, "A Novel Grasping Mechanism for Flat-shaped Objects Inspired by Lateral Grasp", Proc. of the 2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS Intl. Conf. on Biomedical Robot-icaand Biomechatronics, pp.282-288, 2008
- [6-9] 佐藤知正, 山田聡一郎, 森武俊, "薄板を用いた爪による食器ハンドリング～食器下に爪をもぐりこませる力の計測～", 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1L25, 2007
- [6-10] 多田隈建二郎, 多田隈理一郎, 寺田一貴, 長谷川浩章, 大石千種, 勅使河原誠一, 明愛国, 下条誠, "微小震動プレート爪機構", 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, AC1A1-07, 2009
- [6-11] 平井慎一, "凸多面錐理論に基づくマニピュレーションの運動学・静力学とそのマニピュレーション計画問題への応用", 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.1, pp.68-8, 1999
- [6-12] 広瀬茂男, 佐藤幹夫, "多自由度ロボットの干渉駆動", 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.2, pp.20-27, 1989