

博士論文



ワイヤ干渉駆動モジュールを用いた  
人型ロボットアームの開発

DEVELOPMENT OF A HUMANOID ROBOT ARM BASED  
ON COUPLED TENDON-DRIVEN JOINT MODULE

李文揚

Li Wenyang

学籍番号 1942008

電気通信大学 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻

博士（工学）の学位申請論文

2022年3月

# ワイヤ干渉駆動モジュールを用いた 人型ロボットアームの開発

博士論文審査委員会

主査	姜 銀来	准教授
	横井 浩史	教授
	青山 尚之	教授
	金森 哉吏	教授
	中村 友昭	准教授

著作權所有者

李 文揚

2022 年 3 月

# 論文の英文要旨

T I T L E	Development of a humanoid robot arm using coupled tendon-driven modules
N A M E	Li Wenyang

In an aging society, there is an increasing demand for robots to interact with humans, support humans and act according to human intentions. This research focuses on the human upper limbs that can perform skillful movements, and aims to build an unprecedented lightweight, high-power, and safe humanoid robot arm that has an appearance and movement performance similar to those of the human upper limbs. Furthermore, the design facilitates installation on existing robots and humans, ensuring practicality and versatility.

Tendon drive is adopted for safety and lightweight, and coupled drive with high motor drive efficiency is adopted to achieve high output. Based on the coupled Tendon-Driven, we proposed a new drive system called the 2-motor 2-DoF and 3-motor 3-DoF coupled tendon-driven module that achieves safety, lightweight, and high output. The coupled tendon-driven joint has the same number of motors as the number of DoFs, but the torque of multiple motors are synergetically acted to the joints with tendons to ensure that each joint is driven by multiple motors. Then, we classify the designs according to the motor position, joint pulley position, and tendon routing method, and propose reference examples for the selection, development, and design of coupled tendon-driven. Modularization shortens the tendon path from the motor to the joint, reduces the amount of elastic deformation of the tendon, and improves precision. We have developed two humanoid robot arms by combining coupled tendon-driven modules. The robot arms developed in this study has the same kinematics as the human arm, with self-weights being 2.2 kg and 2.57 kg and payloads being 1.5 kg and 2.5 kg, respectively. They are lighter than the arm of an average adult. The proportionality between the payload and its own weight is 0.5 or more.

## 論文の和文概要

論文題目	ワイヤ干渉駆動モジュールを用いた人型ロボットアームの開発
氏名	李文揚 (Li Wenyang)
<p>本研究では、ワイヤ干渉駆動に基づいて、安全、軽量、高出力を図る2モータ2自由度と3モータ3自由度ワイヤ干渉駆動モジュールを提案した。そして、モータの位置、関節プーリーの位置とワイヤのルーティング方式によって分類し、ワイヤ干渉駆動の選択、開発および設計に参考例を提案した。ワイヤ干渉駆動モジュールの組み合わせによって、2つの人型ロボットアームを開発した。本研究で開発したロボットアームは、人間の腕と同じ運動学を有し、自重はヒトの腕より軽くそれぞれ2.2kgと2.57kgであり、ペーロードはそれぞれ1.5kgと2.5kgである、また、ペーロードと自重の比が0.5以上である。</p>	

# 目次

目次.....	I
図目次.....	VII
表目次.....	XIII
<b>第1章 序論.....</b>	<b>1</b>
1.1 背景.....	2
1.2 従来研究.....	3
1.2.1 ヒトの腕.....	3
1.2.2 既存のロボットアーム.....	4
1.2.2.1 自由度の配置.....	6
1.2.2.2 伝動機構.....	7
1.2.2.3 ロボットアームの出力/自重.....	8
1.2.3 従来研究の問題点.....	10
1.2.3.1 自由度.....	10
1.2.3.2 伝動機構.....	10
1.2.3.3 出力/自重.....	12
1.3 研究目的及び解決策.....	14
1.3.1 研究目的.....	14
1.3.2 目指す人型ロボットアーム.....	14
1.3.3 解決策.....	16
1.3.3.1 軽量化.....	16
1.3.3.2 高出力.....	16
1.3.3.3 精度, 耐久性と保全性.....	17
1.4 本論文の構成.....	18
<b>第2章 全駆動型ワイヤ干渉駆動の解析.....</b>	<b>19</b>
2.1 ワイヤ干渉駆動とは.....	20
2.2 角度からワイヤ干渉駆動の解析.....	22
2.2.1 1個のモーターとn個の関節.....	22
2.2.2 n個のモーターとn個の関節.....	24

---

2.3	トルクからワイヤ干渉駆動の解析	27
2.4	ワイヤルーティング行列	31
2.5	本論文のワイヤ干渉駆動	33
2.6	モジュールの必要性	34
2.6.1	モジュール化—精度の向上	34
2.6.2	モジュール化—メンテナンス性の向上	35
2.6.3	モジュール化のまとめ	37
2.7	ワイヤ干渉駆動の検証	38
2.8	ワイヤ干渉駆動の解析方法	45
2.9	まとめ	48
<b>第3章</b>	<b>2モーター2自由度ワイヤ干渉駆動モジュール</b>	<b>49</b>
3.1	はじめに	50
3.2	2モーター2自由度の干渉駆動	51
3.2.1	2モーター2自由度マニピュレータの例	51
3.2.2	2モーター2自由度マニピュレータのワイヤルーティング	52
3.3	2モーター2自由度干渉駆動モジュールの分類	58
3.4	2モーター外付け機構	60
3.4.1	ワイヤルーティングの説明	60
3.4.2	トルクと角度	61
3.4.3	機構の特徴	62
3.5	2モーター内蔵同軸機構	63
3.5.1	ワイヤルーティングの説明	63
3.5.2	トルクと角度	64
3.5.3	機構の特徴	65
3.6	1モーター外付け機構	67
3.6.1	ワイヤルーティングの説明	67
3.6.2	トルクと角度	68
3.6.3	機構の特徴	69
3.7	2モーター内蔵異軸機構	71
3.7.1	ワイヤルーティングの説明	71
3.7.2	トルクと角度	72
3.7.3	機構の特徴	73
3.8	4種類の機構特徴の対比	74
3.9	モーターの配置による精度の向上	76

3.10	まとめ	80
<b>第4章</b>	<b>3 モーター3自由度ワイヤ干涉駆動モジュール</b>	<b>81</b>
4.1	はじめに	82
4.2	3 モーター3 自由度の干涉駆動	83
4.3	3 モーター3 自由度干涉駆動モジュールの分類	85
4.4	FULLY-ROUTED MOTOR-JOINT 形式	87
4.4.1	ワイヤルーティングの説明	87
4.5	1-UNROUTED MOTOR-JOINT 形式	92
4.5.1	ワイヤルーティングの説明	92
4.5.2	トルク解析	93
4.5.3	角度解析	95
4.6	2-UNROUTED MOTOR-JOINT 形式	97
4.6.1	ワイヤルーティングの説明	97
4.6.2	トルク解析	98
4.6.3	角度解析	100
4.7	3-UNROUTED MOTOR-JOINT 形式	102
4.7.1	ワイヤルーティングの説明	102
4.7.2	トルク解析	103
4.7.3	角度解析	105
4.8	4 種類の機構解析の対比	107
4.9	まとめ	111
<b>第5章</b>	<b>7自由度ロボットアーム</b>	<b>113</b>
5.1	はじめに	115
5.2	7自由度ワイヤ干涉駆動ロボットアームの設計開発	116
5.2.1	剛性と柔軟性を併せ持つ	116
5.2.2	人と同じ運動学の重要性	117
5.2.3	ロボットアームのモジュール分割	117
5.3	ロボットアーム—Aタイプの開発	120
5.3.1	各関節のワイヤルーティング形式の選択	120
5.3.1.1	肩関節モジュール	120
5.3.1.2	肘関節モジュール	124
5.3.1.3	手首関節モジュール	126
5.3.2	ロボットアーム— Aタイプの全体像	128

---

5.4	ロボットアーム— Bタイプの開発	130
5.4.1	各関節のワイヤルーティング形式の選択	130
5.4.1.1	肩関節モジュール	130
5.4.1.2	肘関節モジュール	136
5.4.1.3	手首関節モジュール	139
5.4.2	ロボットアーム— Bタイプの全体像	141
5.5	ワイヤ張力調整機構	143
5.5.1	中空ねじ式	143
5.5.2	メカロックまたワンウェイクラッチ式	145
5.5.3	プーリー式	146
5.6	干渉と非干渉の共存	148
5.6.1	ユニバーサルジョイント式	149
5.6.2	可動アイドラプーリー式	150
5.6.3	2-DoF ローリングジョイント	152
5.7	ロボットアームの評価実験	153
5.7.1	ロボットアームの制御システム	153
5.7.2	角度及び消費電流の検証実験	153
5.7.3	ロボットアーム— Aタイプの検証実験	154
5.7.3.1	角度の検証実験	155
5.7.3.2	消費電流の検証実験	159
5.7.4	ロボットアーム— Bタイプの検証実験	163
5.7.4.1	角度の検証実験	164
5.7.4.2	消費電流の検証実験	168
5.7.5	繰り返し精度に関する評価実験	172
5.7.5.1	ロボットアーム— Aタイプの精度実験	173
5.7.5.2	ロボットアーム— Bタイプの精度実験	178
5.7.6	トルクに関する評価実験	182
5.7.6.1	関節トルクの推定	182
5.7.6.2	最大負荷	184
5.8	まとめ	185
5.8.1	ロボットアームの仕様	185
5.8.2	ロボットアームの考察	189
<b>第6章</b>	<b>結論と展望</b>	<b>191</b>
6.1	結論	192

6.2 展望.....	195
謝辭.....	199
参考文献.....	203
研究業績.....	207



# 图 目 次

Fig 1-1. DoF arrangement of human arm. ....	3
Fig. 1-2. DoF arrangement of major humanoid robot arm.....	6
Fig. 1-3. Comparison of different arms (payload, weight).....	9
Fig 1-4. A goal that the existing robot arm has not yet achieved.....	12
Fig 1-5. The goal of the robot arm. ....	15
Fig. 2-1. Schematic diagram of one motor driving n joints. ....	22
Fig. 2-2. Schematic diagram of n motor driving n joints(angle). ....	25
Fig. 2-3. Schematic diagram of n motor driving n joints (Torque) .....	27
Fig. 2-4. Conceptual structures of robotic arms (a), Harmonic gear or direct drive structure. (b) tendon driven structure, (c)Modularized tendon driven structure.....	36
Fig. 2-5. A verification structure with 2 motors and 2 DoF coupled tendon driven .....	38
Fig. 2-6. Experiment system for comparison. (a): 2M2D tendon-driven. (b): 1M1D directly- actuated joint module .....	40
Fig. 2-7. Motor position and error .....	41
Fig. 2-8. Motor consumption current.....	42
Fig. 2-9. Current comparison .....	44
Fig. 2-10. Example of coupled tendon drive.....	45
Fig. 2-11. The definition and rules of the positive direction.....	46
Fig. 3-1. Schematic diagram of the 2 motor 2 DoF manipulator.....	51
Fig. 3-2. Wire routing format with 2 DoF tendon driven.....	52
Fig. 3-3. Classification of mechanisms according to the position of the motor .....	59
Fig. 3-4. Externally-Actuated Structure of Wire Routing .....	60
Fig. 3-5. Externally-Actuated Structure .....	62
Fig. 3-6. Internally-Coaxially-Actuated Structure of Wire Routing.....	63
Fig. 3-7. Internally-Coaxially-Actuated Structure .....	66
Fig. 3-8. Internally-Separately-Actuated Structure of Wire Routing.....	67

<b>Fig. 3-9. Internally-Separately-Actuated Structure .....</b>	<b>70</b>
<b>Fig. 3-10. Hybrid-Actuated Structure of Wire Routing .....</b>	<b>71</b>
<b>Fig. 3-11. Hybrid-Actuated Structure.....</b>	<b>73</b>
<b>Fig 3-12. Position experiment of different wire lengths .....</b>	<b>77</b>
<b>Fig 3-13. Position accuracy experiment.....</b>	<b>78</b>
<b>Fig 3-14. Experimental results of position accuracy. The position change near 90° was enlarged on the below side. ....</b>	<b>79</b>
<b>Fig. 4-1. Three-DoF planar manipulator as an example of 3M3D joint modules. (a) 3D model. (b) Planar schematic representation. For clarity, the motor-joint separate coupling structure is adopted. The example belongs to the after-mentioned fully-routed motor- joint form.....</b>	<b>83</b>
<b>Fig. 4-2. Classification according to the position of the motor .....</b>	<b>85</b>
<b>Fig. 4-3. Fully-Routed Motor-Joint form of Wire Routing.....</b>	<b>87</b>
<b>Fig. 4-4. 1-Unrouted Motor-Joint form of Wire Routing.....</b>	<b>92</b>
<b>Fig. 4-5. 2-Unrouted Motor-Joint of Wire Routing .....</b>	<b>97</b>
<b>Fig. 4-6. 3-Unrouted Motor-Joint of Wire Routing .....</b>	<b>102</b>
<b>Fig. 5-1. Movements of Human Arm .....</b>	<b>117</b>
<b>Fig. 5-2. The module design of Humanoid Robot Arm .....</b>	<b>118</b>
<b>Fig. 5-3. The wire routing diagram of robot arm A type (Shoulder joint).....</b>	<b>122</b>
<b>Fig. 5-4. Photo of the robot arm A type(Shoulder joint). ....</b>	<b>122</b>
<b>Fig. 5-5. Design drawing of the robot arm A type(Shoulder joint).....</b>	<b>123</b>
<b>Fig. 5-6. The wire routing diagram of robot arm A type (Elbow joint). ....</b>	<b>124</b>
<b>Fig. 5-7. Design drawing of the robot arm A type(Elbow joint) .....</b>	<b>125</b>
<b>Fig. 5-8. Photo of the robot arm A type(Elbow joint).....</b>	<b>126</b>
<b>Fig. 5-9. The wire routing diagram of robot arm A type (Wrist joint). ....</b>	<b>127</b>
<b>Fig. 5-10. Design drawing of the robot arm A type(Wrist joint) .....</b>	<b>127</b>
<b>Fig. 5-11. Photo of the robot arm A type(Wrist joint). ....</b>	<b>128</b>
<b>Fig. 5-12. Overall picture of robot arm A type.....</b>	<b>129</b>
<b>Fig. 5-13. Wire Routing. (a)2-Unrouted Motor-Joint of Wire Routing. (b) Movement of shoulder joint (c)Tendon routing form and motor location of the humanoid shoulder.(d)Coupling</b>	

and non-coupling coexist in joint 2. (e)2-DoF rolling joint of joint 2. solves the non-coupling problem. .... 132

Fig. 5-14. Design and implementation of the 3M3D humanoid shoulder. (a) and (b) are photos of the shoulder joint. (c) shows the tendon routing for fixing the 2-DoF rolling joint. An adjustment pulley was added to adjust the initial angle of joint 2. (d), (e), and (f) show the routing of tendons from motor 1, motor 2, and motor 3. .... 136

Fig. 5-15. (a) Movement of Elbow joint.(b) Externally-Actuated Structure of Wire Routing (c) The wire routing diagram of robot arm B type (Elbow joint) ..... 137

Fig. 5-16. (a) Design drawing of the robot arm B type(Elbow joint) . (b) Photo of the robot arm B type(Elbow joint) . .... 138

Fig. 5-17. (a) Movement of Wrist joint. (b) Externally-Actuated Structure of Wire Routing (c) The wire routing diagram of robot arm B type (Elbow joint) ..... 139

Fig. 5-18. (a) Design drawing of the robot arm B type(Wrist joint) . (b) Photo of the robot arm B type(Wrist joint) ..... 140

Fig. 5-19. Overall picture of robot arm B type ..... 142

Fig. 5-20. Schematic diagram of tendon tension adjustment Structure (Hollow screw). .... 144

Fig. 5-21. Photo of Tendon Tension Adjustment Structure(Hollow screw) ..... 144

Fig. 5-22. Schematic diagram of tendon tension adjustment Structure (One-way clutch). .... 145

Fig. 5-23. Photo of Tendon Tension Adjustment Structure(One-way clutch). .... 146

Fig. 5-24. Principles and photos of the structure of tendon tension adjustment. .... 147

Fig. 5-25. Coupled and Uncoupled schematic diagram..... 148

Fig. 5-26. Use universal joints to enable uncoupling ..... 149

Fig. 5-27. Schematic diagram of decoupling mechanism ..... 150

Fig. 5-28. (a) Wire adjustment mechanism. (b) Profile and structure design of cam 2. (c) Profile and structure design of cam 1. .... 151

Fig. 5-29. Schematic diagram of coupling and non-coupling realized by 2-DOF rolling joint... 152

Fig 5-30. Architecture of the control system ..... 153

Fig. 5-31. Wire routing of robot arm A type..... 154

**Fig. 5-32. Angle experiment of robot arm A type. (a) Rotation of each joint in the shoulder joint  
 (b) Rotation of each joint in the elbow joint (c) Rotation of each joint in the wrist joint  
 ..... 155**

**Fig. 5-33. Motor position of robot arm A type (a)(b)(c) are motors position of shoulder joint.  
 (d)(e) are motors position of elbow joint. (f)(g) are motor position of wrist joint..... 157**

**Fig. 5-34. Current consumption experiment(A type). (a) The motor drives directly to lift a load.  
 (b) Each joint of the shoulder joint to lift the same load. (c) Each joint of the elbow joint  
 to lift the same load. (d) Each joint of the shoulder joint to lift the wrist load..... 159**

**Fig. 5-35. Current consumption of motors (A type). (a) and (g) are direct drive of motors. (b)-(f)  
 and (h) (i) Separate rotation of Each joint..... 161**

**Fig. 5-36. Wire routing of robot arm B type ..... 163**

**Fig. 5-37. Angle experiment of robot arm B type. (a) Rotation of each joint in the shoulder joint  
 (b) Rotation of each joint in the elbow joint (c) Rotation of each joint in the wrist joint  
 ..... 165**

**Fig. 5-38. Motor position of robot arm B type (a)(b)(c) are motors position of shoulder joint.  
 (d)(e) are motors position of elbow joint. (f)(g) are motor position of wrist joint..... 167**

**Fig. 5-39. Current consumption experiment(B type). (a), (b) and (c) are motor drives directly to  
 lift a load. (d) Each joint of the shoulder joint to lift the same load. (e) Each joint of the  
 elbow joint to lift the same load. (f) Each joint of the shoulder joint to lift the wrist load.  
 ..... 168**

**Fig. 5-40. Current consumption of motors (B type). (a) (e) and (h) are direct drive of motors. (b)-  
 (d),(f) and (g), (i) and (j) Separate rotation of Each joint..... 171**

**Fig. 5-41. Position accuracy experiment of robot arm A type ..... 173**

**Fig. 5-42. Experiment procedure of robot arm A type ..... 173**

**Fig. 5-43. Paths of the three joint modules and the arm without Load(robot arm A type) (a)  
 shoulder joint module, (c) elbow joint module, (e) wrist joint module, (g) entire arm.  
 Paths of the three joint modules and the arm with 500g Load: (b) shoulder joint module,  
 (d) elbow joint module, (f) wrist joint module, (h) entire arm..... 175**

**Fig. 5-44. Position accuracy experiment of robot arm B type ..... 178**

**Fig. 5-45. Experiment procedure of robot arm B type ..... 178**

**Fig. 5-46. Paths of the three joint modules and the arm without Load(robot arm B type) (a) shoulder joint module, (c) elbow joint module, (e) wrist joint module, (g) entire arm. Paths of the three joint modules and the arm with 500g Load: (b) shoulder joint module, (d) elbow joint module, (f) wrist joint module, (h) entire arm..... 180**

**Fig. 5-47. Test motor torque. (a) Motors used in the shoulder and elbow joints of the robot arm A type. (b) Motors used in the wrist joint of the robot arm A type. (c) Motors used in the shoulder joint of the robot arm B type. (d) Motors used in the elbow joint of the robot arm B type. (e) Motors used in the wrist joint of the robot arm B type..... 182**

**Fig. 5-48. (a) Maximum load for forwarding flexion and abduction of the robotic arm A type. (b) Maximum load for forwarding flexion of the robotic arm B type. (c) Maximum load for abduction of the robotic arm B type. .... 184**

**Fig. 5-49. Overall picture of the robot arm (a) robot arm A type. (b) robot arm B type. .... 187**

**Fig. 5-50. Comparison of robot arms..... 190**

**Fig. 6-1. The proprioception of the human body ..... 195**

**Fig. 6-2. Upper body humanoid robot ..... 196**

**Fig. 6-3. Development of a system integrating sensory and parallel control..... 197**

---



## 表 目 次

<b>Table 1-1. Specifications of humanoid robotic arms with different drive methods.....</b>	<b>5</b>
<b>Table 1-2. robotic arm Transmission mechanism .....</b>	<b>11</b>
<b>Table 3-1. The relationship between motors and joints (Angle, Torque).....</b>	<b>55</b>
<b>Table 3-2. Compare .....</b>	<b>74</b>
<b>Table 4-1. Torque of each joint in Fully-Routed Motor-Joint form .....</b>	<b>90</b>
<b>Table 4-2. Torque of each joint in Fully-Routed Motor-Joint form .....</b>	<b>95</b>
<b>Table 4-3. Torque of each joint in 2-Unrouted Motor-Joint form .....</b>	<b>100</b>
<b>Table 4-4. Torque of each joint in 3-Unrouted Motor-Joint form .....</b>	<b>104</b>
<b>Table 4-5. Comparison of 4 forms .....</b>	<b>108</b>
<b>Table 4-6. Motor status in 4 forms .....</b>	<b>109</b>
<b>Table 5-1. Polhemus Motion Tracking System.....</b>	<b>172</b>
<b>Table 5-2. Maximum errors of robot arm A type.....</b>	<b>177</b>
<b>Table 5-3. Maximum errors of robot arm B type .....</b>	<b>181</b>
<b>Table 5-4. Estimated joint torque according to motor torque.....</b>	<b>183</b>
<b>Table 5-5. The movable range of the joint.....</b>	<b>185</b>
<b>Table 5-6. Specification .....</b>	<b>187</b>
<b>Table 5-7. Comparison of robot arms .....</b>	<b>189</b>



# 第1章 序論

---

1.1 背景.....	2
1.2 従来研究.....	3
1.2.1 ヒトの腕.....	3
1.2.2 既存のロボットアーム.....	4
1.2.2.1 自由度の配置.....	6
1.2.2.2 伝動機構.....	7
1.2.2.3 ロボットアームの出力/自重.....	8
1.2.3 従来研究の問題点.....	10
1.2.3.1 自由度.....	10
1.2.3.2 伝動機構.....	10
1.2.3.3 出力/自重.....	12
1.3 研究目的及び解決策.....	14
1.3.1 研究目的.....	14
1.3.2 目指す人型ロボットアーム.....	14
1.3.3 解決策.....	16
1.3.3.1 軽量化.....	16
1.3.3.2 高出力.....	16
1.3.3.3 精度, 耐久性と保全性.....	17
1.4 本論文の構成.....	18

---

## 1.1 背景

人口の高齢化が進みつつある。日本の65歳以上の高齢者人口は、2020年には総人口の28.8%である[1]。中国では、60歳以上の人口は18%以上を占めている[2]。ウクライナ、ドイツ、ロシアなどの世界の他の国々でも、厳しい少子化問題が生じ、高齢化がさらに進む一方である。また、日本では、筋萎縮性側索硬化症や頸髄損傷などの四肢麻痺患者は約39万人がいる[3]。2012年まで、中国の身体不自由者は2472万人。将来的には、高齢化と少子化の進行により、高齢者や身体不自由者を介護できる介護労働者が少なくなる。そして、超高齢社会における高齢者・障がい者の自立やQOL（生活の質）向上の外部機器の需要が高まっている[4]。

ロボットは徐々に人間に取って代わっている。昔は、ロボットのプログラムを設定して自動的に実行するだけでよいため、ほとんどのロボットは工場や農業などで繰り返し作業を行っていて、特殊や突発問題が少なかった。こういった問題が発生しても、せいぜい経済的損失だけである。ロボットは徐々に具体的かつ実用的になりつつあり、人間ができないことをするためにはロボットが必要となることがある。たとえば、有毒、有害、または危険な環境から人々を救助したり、災害救援を行ったりすることが挙げられる。現在、ロボットは人間の生活に入り込み、人々との相互作用や密接な接触がますます増えている。ロボットを利用して高齢者や身体不自由者の世話をすることで、将来の介護労働者不足の問題の解決が期待できる[5]。遠隔操作により、高齢者や身体不自由者への迅速な支援も可能になる。このようなロボットには、優れたロボットアームが必要である。このロボットアームを持ってこそ、ロボットは人間に代わったり、または人間を支援したりして作業をすることができる。このようなロボットアームに、軽量性、高出力が求められる。それと同時に、人と接する際のロボットアームの不慣れを軽減し、遠隔操作中のロボットアームと人間の動きの不一致の危険を回避するため、または、患者に直接取り付けられるため、このようなロボットアームは、人間と同じ運動学を備える必要がある。ロボットアームに、軽量、高出力、複数の自由度、耐久性、保全性、精度を同時に持たせることは、依然として大きな課題である[6]。

## 1.2 従来研究

ヒトの上肢運動機能による日常生活動作を代替するためには、人間の運動学に対応のロボットアームが必要である。また、臨床現場への導入を想定した場合、小規模・軽量であることも求められる。つまり、出力/自重比の大きなロボットアームが要求される。本節では、人間の腕を説明し、発表または市販の人型ロボットアームの自由度、伝動機構、負荷、および自重を要約する。

### 1.2.1 ヒトの腕

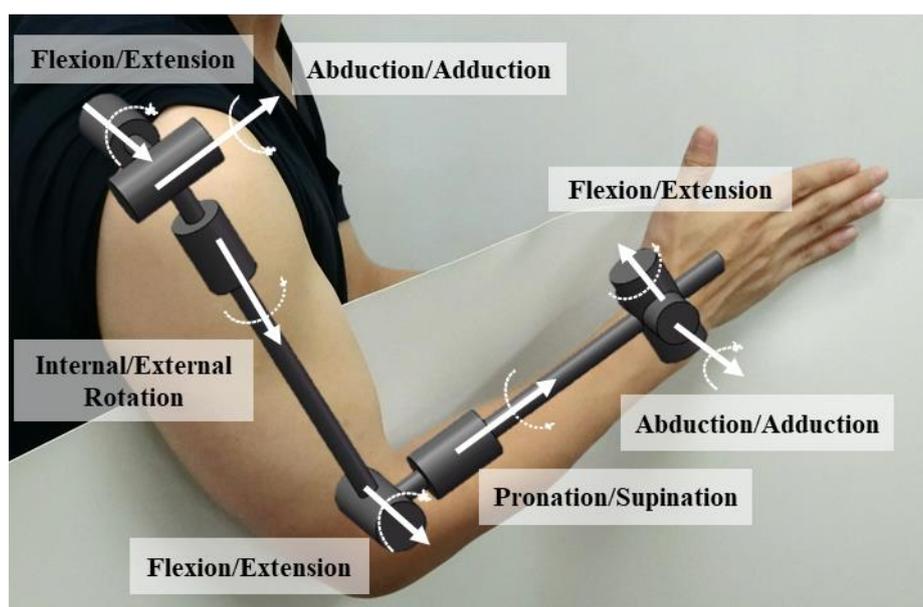


Fig 1-1. DoF arrangement of human arm.

人間の腕の総重量は体重の約 5.2% であり、そのうち上腕が 3%、前腕が 1.6%、手が 0.6% を占めている[7]。人間の腕には、手を除いて 7 つの DOF (Degree of Freedom) がある。肩関節は球関節であり、上腕の前方挙上 (屈曲) と後方挙上 (伸展) が関節の内側軸と外側軸を中心に行っている。上腕の横方向の挙上 (外転) と手足の正中線に向かう動き (内転)。上腕を外側 (外旋) および内向き (内旋) にひねる動き。上腕の前方挙上 (屈曲) と後方挙上 (伸展) は、関節の内側軸と外側軸の中心にある。上腕

の横方向の挙上（外転）は前後軸を中心とし，その動きによって上腕の挙上が体幹に引き付けられる（内転）．上腕を外側にねじる動き（外旋）と上腕を内側にねじる動き（内回転）が観察される．肘関節は，屈曲と伸展の動きしか実行できない一軸関節である．この場合，肘関節を水平に横切る移動軸は1つだけである．前腕では，前腕の骨（橈骨と尺骨）がほぼ平行に配置され，軸を形成する．前腕の骨は，前腕のねじれ運動（回内および回外）を可能にする．一方，橈骨は尺骨の周りを移動するように形作られている．手首関節は二軸関節であり，手首を曲げたり伸ばしたりすることができる．これらの動きは比較的大きい．横に傾く動き，すなわち外転と内転の動きは比較的小さい[8] [9] ．

### 1.2.2 既存のロボットアーム

発表または市販されているロボットアームを調査し，名前，DOF/アクチュエータ，伝動，自重と負荷を表 1-1 に分類した．各ロボットアームの性能を比較するために，ペイロードと自重の比率を比べて，大きいものから順に小さいものまで並べて，表 1-1 にまとめた．次に，ヒトの運動学，伝動機構，および自重/負荷の対比から，これらのロボットアームについて詳細に解析する．

Table 1-1. Specifications of humanoid robotic arms with different drive methods

No.	Name	DOFs/ Actuators	Transmission mechanism	Weight (kg)	Payload (kg)	Payload /Weight	Ref.
(1)	LWR III	7/7	Harmonic gear	14.0	14.0	1.00	[10]
(2)	KINOVA Gen3	7/7	Harmonic gear	8.3	4.5	0.54	[11]
(3)	LIMS	7/7	Tendon + Timing Belt	5.5	2.9	0.53	[12]
(4)	LWA 4P	6/6	Harmonic gear	12.5	6.0	0.48	[13]
(5)	Y. Tsumaki et al.	7/8	Tendon	2.9	1.5	0.52	[14]
(6)	LBR iiwa7R800 7	7/7	Harmonic gear	22.3	7.0	0.31	[10]
(7)	UR5	6/6	Harmonic gear	18.4	5.0	0.27	[13]
(8)	VS-6577G-B	6/6	Harmonic gear	36.0	7.0	0.19	[10]
(9)	M. Quigley et al.	7/7	Tendon + Timing Belt	11.4	2.0	0.18	[15]
(10)	SIA5F	7/7	Harmonic gear	30.0	5.0	0.17	[10]
(11)	MIA	7/14	Harmonic gear	25.0	3.0	0.12	[16]
(12)	KR Agilus 6 R700	6/6	Harmonic gear	50.0	6.0	0.12	[13]
(13)	WAM Arm	7/7	Tendon	27.0	3.0	0.11	[17]
(14)	LWH	8/8	Direct drive	3.5	0.3	0.09	[18]
(15)	Animator arm	5/3	Gear	-	0.18	--	[19]
(16)	D. A. Bennett et al.	4/2	Gear+Tendon+Chain	1.9	--	--	[20]
(17)	Kawashima et al.	6/6	Pneumatic artificial muscle	--	--	--	[21]
(18)	WE-4R	9/9	Direct driven+Timing Belt	--	--	--	[22]
(19)	iCub	7/7	Tendon	--	--	--	[23]
(20)	H. Kim et al.	6/6	Tendon+Gear	--	--	--	[24]
(21)	7R	7/4	Pneumatic artificial muscle	--	--	--	[25]
(22)	Myrobotics	4/9	Tendon	--	--	--	[26]
(23)	M. Sekine	4/16	Tendon	0.776	--	--	[27]

(--) No published data

## 1.2.2.1 自由度の配置

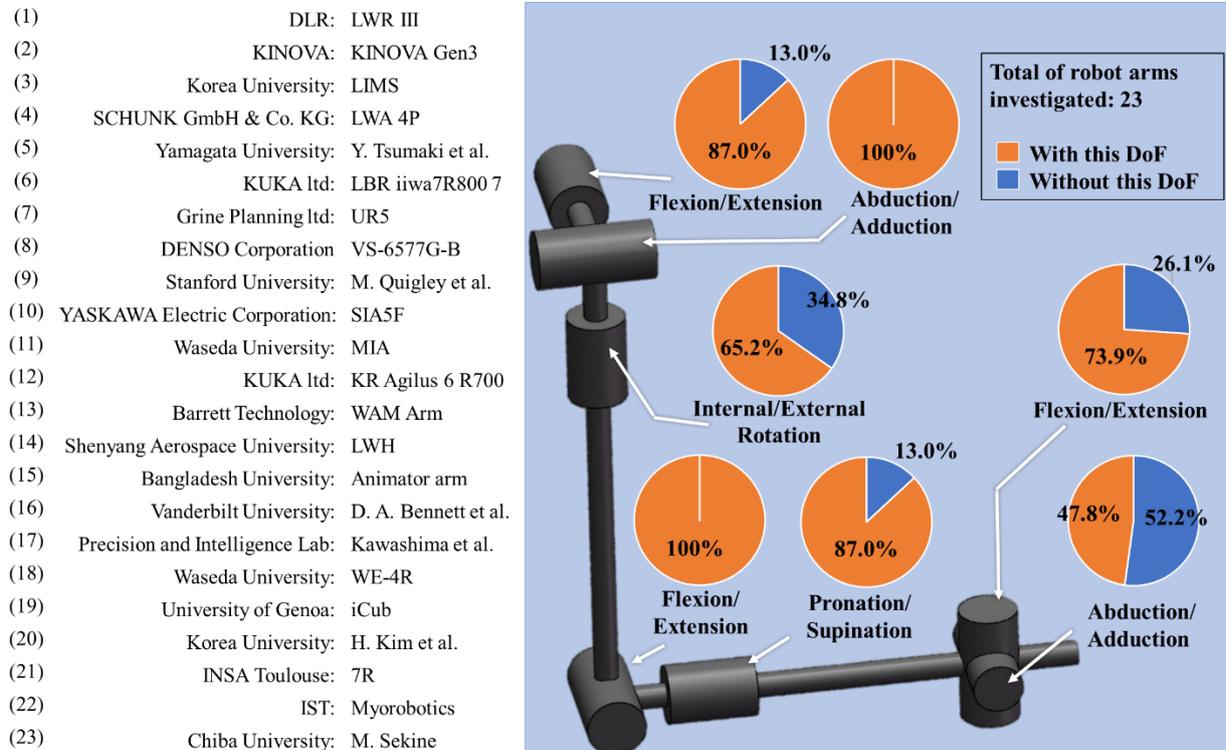


Fig. 1-2. DoF arrangement of major humanoid robot arm

市場に出回っているロボットアームを調査し、自由度の配置をヒトの腕と比較した(図 1-2). 図 1-2 の右側は、ロボットの名前と対応する会社または学校の名前である。左側は、これらのロボットアームにおける、ヒト腕のさまざまな自由度の有無をまとめたものである。関節 2 と関節 4 は、すべてのロボットアームが持つ自由度であり、関節 1, 関節 5, および関節 6 も、ほとんどのロボットアームが持つ自由度である。関節 7 は、ほとんどのロボットアームに存在しない自由度である。一部の産業向けロボットは、関節 7 を放棄し、関節 5 と同じ回転自由度に置き換える方式を採用している。これにより、ロボットアームの効率を向上させることができる。たとえば、図 1-2(4)(6)(7)(8)(10)(12)(13)(20)に示したロボットアームである。さらに、人間の手首の 2 つの自由度は同心である。(2), (5), (21)は同時に関節 6 と関節 7 を持っているが、同じ中心にないため、ヒト手首の動きとは異なる。アクチュエータまたは回転機構が大

きすぎるため、全体のサイズを考慮すると、2つの自由度を別々に配置する必要がある。図1-2の灰色のロボットアームだけが、人間と同じ運動学を持っている。

### 1.2.2.2 伝動機構

#### ➤ ワイヤ

非干渉駆動では、一つのモーターが一つの関節を別々に駆動し、1つの関節だけが運動中に他のすべてのモーターが待機であり、これはモーター資源の浪費であると考えられる。例として、LIMSのアームが挙げられる。しかし、干渉駆動は、より大きなペイロードを達成するために、モータートルクを再配置することができる。それは、その配列およびワイヤルーティングの柔軟性のため、他の駆動方法より、ワイヤで干渉駆動をすることがより簡単である。

ワイヤ干渉駆動は、1つの関節だけが運動中に、2つ以上のアクチュエータが同時に動作する駆動である。ワイヤ干渉駆動は同じトルク出力条件の小さいアクチュエータと同じアクチュエータを持つ大きな関節トルクを使用することで機構のサイズと重量を低減することができる。例えば、WAM arm, iCub, Y. Tsumaki et al.のアームには干渉駆動が適用されている。

#### ➤ 歯車

歯車は伝動比によって機械的に優位になり、歯車装置は動力源の速度、トルク、方向を変えることができる。Animator arm は、複数の平歯車を含む歯車ボックスを使用して、入力と出力の回転速度比とトルク比を変化させる。D. A. Bennett et al.は、手首にウォームホイールのセットを持つロボットアームを設計し、より小さいサイズで30:1の伝動比を提供した。ほとんどは波動歯車を使う。波動歯車伝動は、伝動比が大きく、伝動効率と精度が高く、騒音も低いなどの利点があるため、商業用ロボットアームに広く応用されている。

▶ 流体（空圧，油圧）

Kawashima et al.は、2 自由度の肩関節，2 自由度の肘関節と 2 自由度の手首関節を含む 6 自由度の空圧ロボットアームを設計した．各自由度は運動と動力伝達のために，2 つの空気圧人工筋肉（PARDM）によって支えられている．Force Robot アームは，空気圧伝動も使用しており，肩には 4 つのシリンダーが取り付けられている．いずれにせよ，外部で空気圧縮機が必要である．油圧伝動のロボットアームは現在存在しない．

▶ 他の伝動機構（ベルト，チェーン）

LIMS アームの肩関節はベルトに駆動される．このベルトは，モーターを減速するために使われる．Bennett et al.は 3 段の伝動装置を備え，2 段減速を含み，手首にワイヤ駆動出力レベル（2.4 : 1 の割合）があるロボットアームを設計した．その高効率性とコンパクト性のために，前の二段階はチェーン伝動を選択した．連携ロボット[28]と産業用ロボット[29]のアームは，バランス機構(CBM)の肘関節に 4 ロッド機構を使用する．

### 1.2.2.3 ロボットアームの出力/自重

ロボットアームの重さはその応用に影響する．その中で，軽量型ロボットアームは障害者の義手として使える．重量型ロボットアームは工場の生産に使用する．さらに，ロボットアームの重量はペイロードと関係があり，理論上は，ロボットアーム重量の増加とともにペイロードも増加する．研究者としては，単位当たりの重量のペイロード容量をできるだけ高くすることが主な目的である．

図 1-3 は重量とペイロードの比較を示している．括弧内の数値は表 1-1 の数値と一致しており，以下の数値は出力と自重の比率である．緑の線は，ロボットアームの負荷が自重の半分であることである．その結果，一般的なロボットのペイロードと重量の比は 0.5 以下であり，より性能の良いロボットアームのペイロードと重量の比は 0.5 以上であることがわかる．LWR III アームの自重は 14 kg で，最大負荷は 14 kg で，負荷重量比は 1 である．高出力密度と軽量材料を使用した堅固な ILM モーターのハー

モニック駆動歯車と、これによって発生する軽量な機構は、この目標を実現するための重要な問題である。LWH アームの単位重量のペイロード容量が一番小さいのは、主にアームが直接駆動を採用しているため、モータートルクが 1 : 1 の伝動比で関節に伝達されるからである。

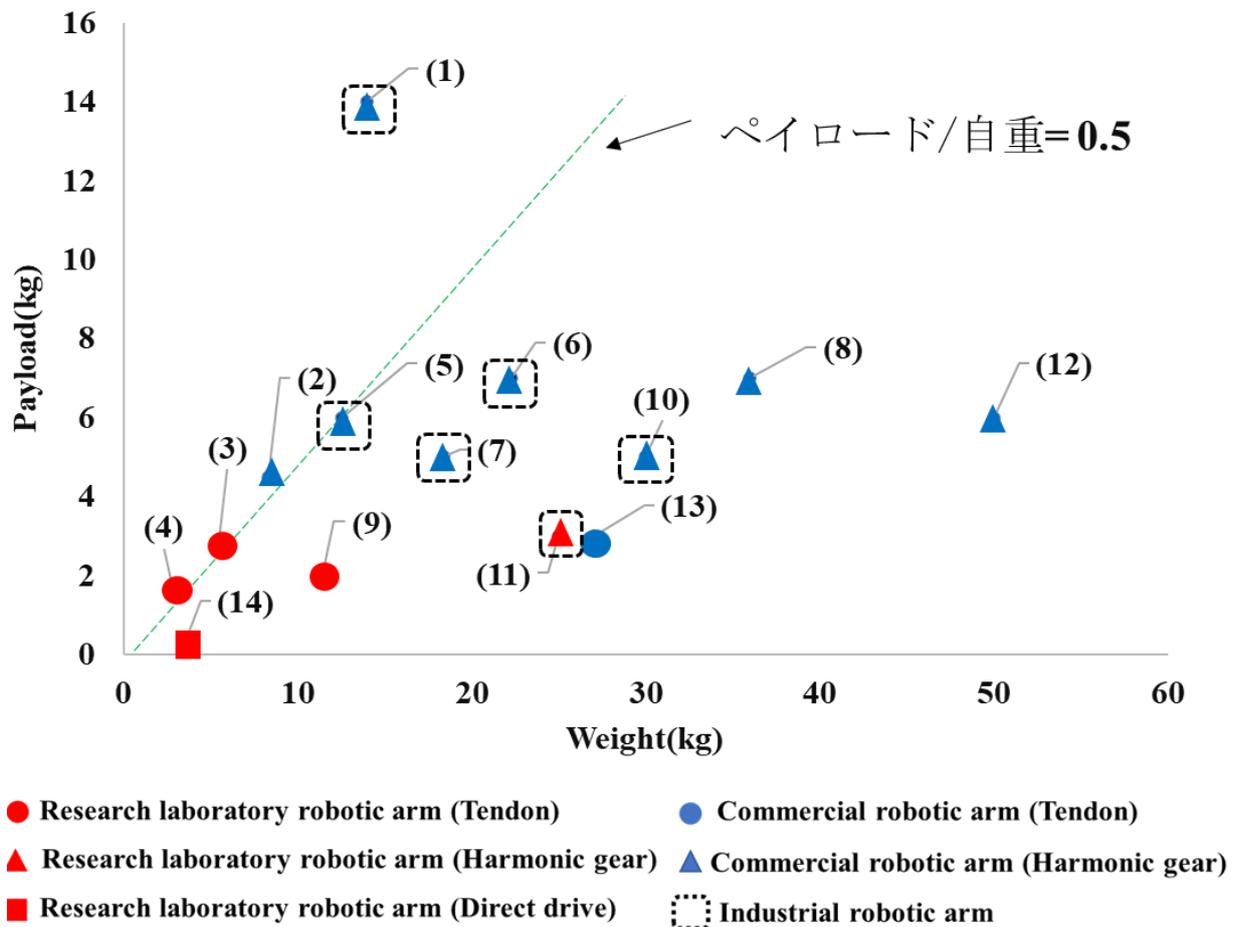


Fig. 1-3. Comparison of different arms (payload, weight)

### 1.2.3 従来研究の問題点

#### 1.2.3.1 自由度

MIA, LIMS, Y.Tsumakiet al, WE-4R の4つロボットアームだけが人間の腕と同じ運動学を持っている。残りのロボットアームは、手首の2つの自由度が同心ではなかったり、手首の運動学がヒト腕の運動学とは完全に異なったりするロボットアームである。MIAの重量が大きすぎるため、Y. Tsumaki et alは、8つのモーターを使用して7自由度を駆動した。WE-4Rに公開されたデータはないが、実験結果から見れば理想的ではない。総体的に言えば、人間と同じ運動学を持っているロボットアームはまだ非常に少ない。

ほとんどのロボットアームは6自由度の設計案を採用している。自由度を増加するとロボットの開発費用も増加し、同時に設計も難しくなる。さらにロボットアームのペイロードが低下され、ロボット全体の制御もしにくくなる。一部の7自由度ロボットアームの手首は、サイズと設計の難しさの問題で、手首の回転軸が違う平面に置かれている。

人の腕の運動学と同じロボットアームはより高い汎用性と実用性を兼ね備える。人とインタラクションをしたり義肢として遠隔操作で人をサポートしたりするとき、このようなロボットアームは患者の訓練時間を減らし、操作を容易にできる。また、人間の運動学と同じであることで、潜在的な危険を回避することができる。特に義肢とするとき、このようなロボットアームは患者が使用する上で扱いやすいと考えられる。そのため、7自由度かつ人の運動学と同じロボットアームの開発が必要だと考えている。

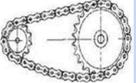
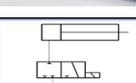
#### 1.2.3.2 伝動機構

表1-2は、先行研究の中に、ロボットアームの伝動機構をまとめたものである。ロボットアームの主な伝動機構はワイヤと歯車である。ワイヤは軽量で伝送距離が長い

という利点があり、アクチュエータを肩の近くに配置して慣性を減らすことができる。また、ワイヤの軽量性と伸縮性による固有の安全性を持っているため、ロボットを開発するのによく使われる。歯車伝動は、伝動比が大きく、伝動効率と精度が高いという利点がある。従来の歯車に比べて、波動歯車はより小さく、伝動比も高いため、軽量でより大きな出力トルクと低い慣性力を得ることができる。波動歯車を使用するロボットアームのほとんどは、工業生産で使用されている。

本論文は、ワイヤをロボットアームの伝動機構として利用する。なぜならば、ワイヤは小型、軽量、柔軟といった利点を同時に持ち、ロボットアームの自重と体積を減らすことができ、人間とのインタラクションにもっと安全だからである。しかし、ワイヤの駆動にいくつかの欠点もある。まず、柔軟性が両刃の剣でもある。柔軟性を持つことで、ロボットアームの安全性を向上させることができるが、精度を低下させる。それは、ワイヤがアクチュエータから関節の末端まで移動する距離が長くなればなるほど、弾性変形の可能性が大きくなり、精度に大きな影響を与えるからである。また、金属疲労により、長時間の負荷でワイヤが変形してしまう。この場合、ワイヤの張力を調整する機構が必要なため、機構も複雑になってしまう。

Table 1-2. robotic arm Transmission mechanism

伝動機構	図	小型化	軽量化	高精度	高負荷	耐久性	柔軟性
ワイヤー		○	○	▲	▲	▲	○
チェーン		×	×	▲	○	○	×
ベルト		▲	×	○	○	○	▲
歯車		▲	▲	○	○	○	×
ボールねじ		▲	×	○	○	○	×
空圧、油圧		×	×	▲	○	○	○ ×

## 1.2.3.3 出力/自重

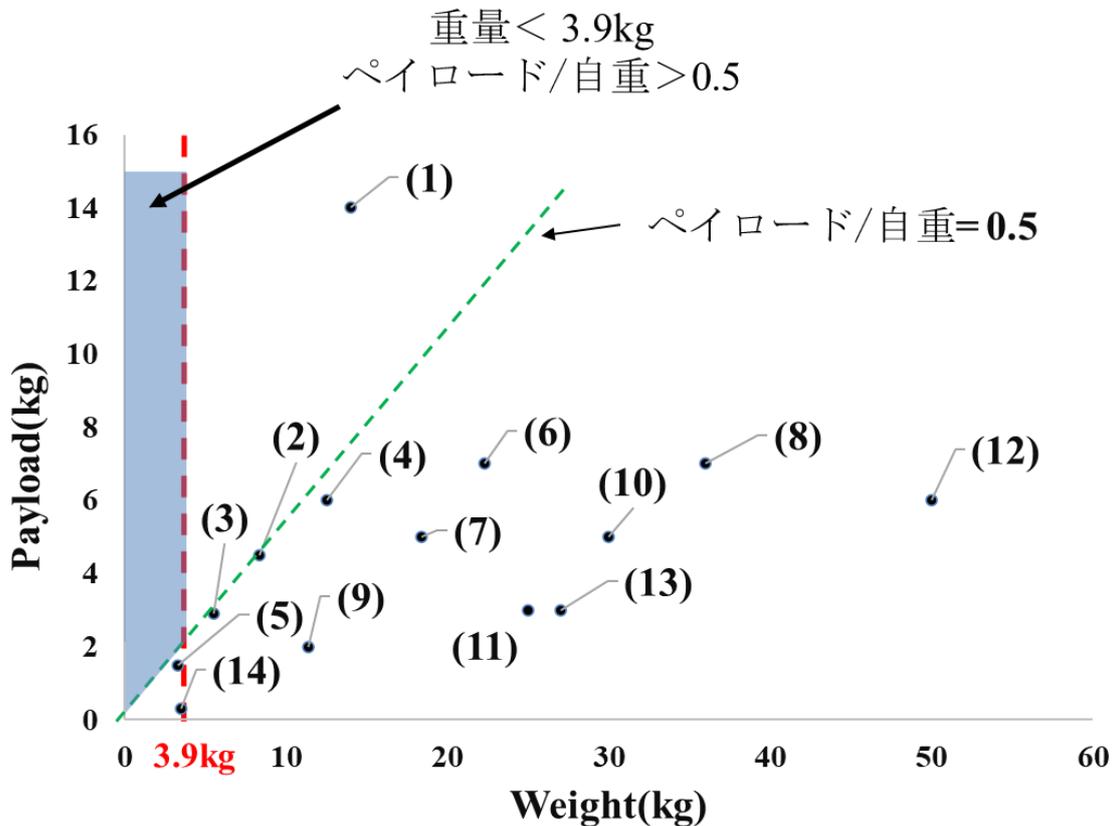


Fig 1-4. A goal that the existing robot arm has not yet achieved.

本論文のロボットアームは主にサービス業での使用、もしくは患者に直接取り付ける義肢としての使用を想定している。そのため、ロボットアームの自重は無視できない問題である。1.2.1 では人間の腕について調査した。その結果、成人男性の平均体重を75 kgとして計算するとき、人間の腕の重量は約3.9kgになることが分かった。このような基準に従う場合、開発するロボットアームの重量は3.9kg以下でなければならない。ロボットアームの自重が低下すると、負荷力も低くなってしまう。こうなればロボットアームの使用価値が失われ、応用範囲も狭くなる。現在開発済みのロボットアームはそれぞれ大きさ、自由度、応用範囲が異なるため、負荷のギャップは非常に大きくなっている。従って、負荷だけでロボットアームの優位性を評価することは

不公平である。そのため、本論文は(1)で述べた負荷と自重の比率に従い、現在開発済みのロボットアームについてまとめた。図1-4からわかるように、現在自重が3.9kg未満でかつ負荷と自重の比率が0.5を超えるロボットアームはない。

すべてのサービスロボットの目標は低自重と高出力であるが、伝達や機構の影響により、出力と自重の比率は大きくない。出力トルクをどのように増やし、自重を減らすかが、現在の学者を悩ませている主な課題である。

## 1.3 研究目的及び解決策

### 1.3.1 研究目的

現在、ロボットは人間の生活に入り込み、人々とのインタラクションや密接な接触がますます増えている。ロボットを利用して高齢者や肢体不自由者の世話をすることで将来の介護労働者不足という問題の解決を期待できる。また遠隔操作により高齢者や肢体不自由者への迅速な支援も可能になる。このようなロボットには、軽量、高出力といった特性を持つロボットアームが必要である。さらに、人と接する際の親和性、および義肢として患者に直接取り付けるという用途を考慮し、人間と同じ運動学をロボットアームに備える必要がある。本研究はワイヤ干涉駆動の課題解決に向けて、低自由度ワイヤ干涉駆動のモジュール化を提案した。人体の関節の動きを再現するため、既存の2自由度ワイヤ干涉駆動を改良し、新しい3自由度ワイヤ干涉駆動を開発する。これらを組み合わせることで、巧みな動作ができる人間の上肢に着目し、上肢と似たような外観と動作性能を備え、これまでにない軽量・高出力人型ロボットアームを構築する。さらに既存のロボットや人間への取り付けを容易にし、実用性と汎用性を確保する。

### 1.3.2 目指す人型ロボットアーム

サービスロボット、外骨格ロボット、義肢などの人間と共存し、人間とインタラクションしたり、人間をサポートしたり、人間の意図を代行したりするためのロボットへの需要が近年高まりつつある。巧みな動作ができる人間の上肢に着目し、上肢と似たような外観と動作性能を備え、軽量・高出力・人型ロボットアームの開発が期待されている。しかし、現在開発済みのロボットアームには次のような問題がある。1、ロボットアームの自由度や運動学は人間の腕とは異なる。2、ロボットアームの低自重と高出力を両立できない。3、既存の軽量なアームの精度、耐久性とメンテナンス性は高くない。

全体的に言えば、人間の腕と完全に同じ運動学を持ち、自重が人間の腕(3.9kg)より軽く、また負荷が自重の半分以上を超えるロボットアームの開発は、依然として困難な課題である。

本研究は巧みな動作ができる人間の上半肢に着目し、上半肢と似たような外観と動作性能を備え、これまでにない軽量・高出力人型ロボットアームの構築を目指す。ロボットアームの主な課題は、軽量，高出力，保守性，精度，耐久性をどのように改善するかということである。同時に、どのようにして自重を減らし、人と同じ運動学を持たせるかということも注目すべき課題である。

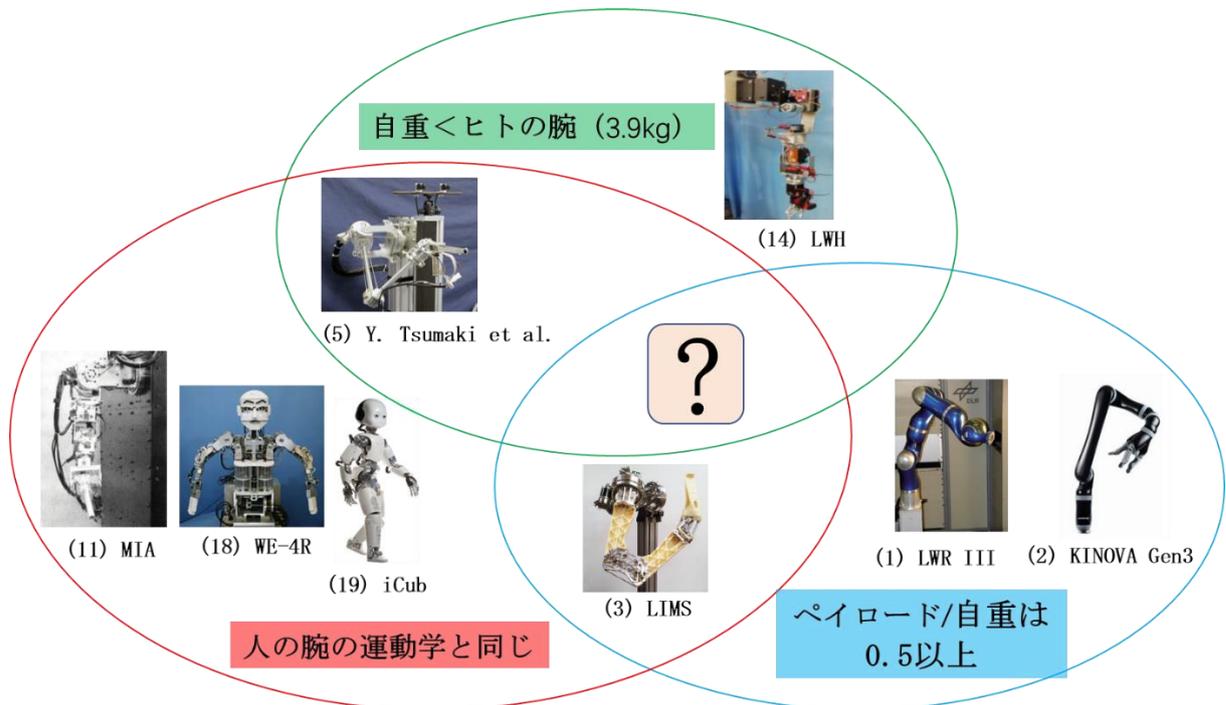


Fig 1-5. The goal of the robot arm.

### 1.3.3 解決策

#### 1.3.3.1 軽量化

調査されたロボットアーム（図 1-3）について、モーターとワイヤで直接駆動されるロボットアームの自重は、他の駆動形式を使用するロボットアームより明らかに低いことが分かるが、負荷力も低いことが分かる。そのため、本論文のロボットアームは軽量化の課題を解決するためにワイヤ駆動を採用する。ワイヤは弾性変形があるため、外力や人との急激な衝撃の際、衝撃の一部を吸収し、人への害を軽減できる。また干渉駆動を使用することでロボットアームの自重を軽減できる。そのため、ロボットアームの慣性トルクも下げられ、ロボットアームと人間との突発的な衝突における安全性がさらに向上される。

#### 1.3.3.2 高出力

現在、ロボットの関節トルクを上げる一般的な方法は以下のとおりである。1、モーターの出力を上げる。この方法は関節トルクを向上することができるが、同時にモーターの体積やサイズも大きくなる傾向があり、ロボットアームの小型化や軽量化には適さない。2、モーターの減速比を変える。通常、歯車またはハーモニック歯車でモーターの減速比を変更する。これは現在産業用ロボットアームが採用する主な方法でもある。メリットは機構がシンプルなことで、デメリットは重いことである。ワイヤ伝動でモーターの減速比を変更することで、自重を減らし、関節トルクを向上することができる。3、ワイヤ干渉駆動を用いる。ワイヤ干渉駆動では複数のアクチュエータが同時に複数の関節を駆動する。アクチュエータの数を増やすことなく関節トルクを増加させることができるため、この駆動方法の応用範囲は広い。既存のワイヤ干渉駆動のほとんどは関節の数よりも多くのアクチュエータを備えているため、ロボットアームの重量が増加しやすい。本論文は、既存の2自由度ワイヤ干渉駆動モジュールを改善し、軽量で高出力なロボットアームの要件を満たすため新しい3自由度ワイヤ干渉駆動モジュールを開発する。

### 1.3.3.3 精度，耐久性と保全性

ワイヤの破断や弛みによる耐久性，保全性と精度の課題を解決するにオリジナルの関節モジュールを開発した．モジュール化はロボットアームをいくつかのモジュールに分け，どのモジュールが損傷しているかにより，対応するモジュールで交換できる．モジュール化はワイヤの弾性変形による誤差を低減することもできる．そして，モジュール化によって，モーターから関節までのワイヤの経路が短くできるほか，ワイヤの弾性変形量も低減され，精度も高められた．

## 1.4 本論文の構成

本章では、研究背景と研究目的を示す。

第2章では、角度とトルクの解析からワイヤ干涉駆動の原理を説明し、消費電流により干涉駆動の有用性を検証することである。

第3章では、2モーター2自由度ワイヤ駆動が可能なワイヤルーティング形式について解析し、干涉と実用性の観点から比較、および干涉駆動の利点を得られたルーティング形式を選定する。さらにモーターの配置位置の違いによるパフォーマンスの違いについて理論的な説明と実験的な検証を行う。

第4章では、3モーター3自由度ワイヤ干涉駆動が可能なワイヤルーティング形式について分類と解析、比較を行う。そして、関節プーリーの位置、ワイヤルーティング形式による干涉駆動の特性について比較する。

第5章は、ワイヤ干涉駆動のモジュール化設計を用いて、2つのヒューマノイド・ロボットアーム（ロボットアームAタイプとBタイプ）を開発する。さらに繰り返し動作精度実験と消費電流の負荷実験によってロボットアームの性能を確認する。最後に先行研究のロボットアームと比較し、本研究で提案したワイヤ干涉駆動モジュールの有用性を確認する。

第6章では、本研究の成果、結論のまとめ、今後の課題および展望について述べる。

## 第2章 全駆動型ワイヤ干渉駆動の解析

---

2.1	ワイヤ干渉駆動とは.....	20
2.2	角度からワイヤ干渉駆動の解析.....	22
2.2.1	1個のモーターとn個の関節.....	22
2.2.2	n個のモーターとn個の関節.....	24
2.3	トルクからワイヤ干渉駆動の解析.....	27
2.4	ワイヤルーティング行列.....	31
2.5	本論文のワイヤ干渉駆動.....	33
2.6	モジュールの必要性.....	34
2.6.1	モジュール化—精度の向上.....	34
2.6.2	モジュール化—メンテナンス性の向上.....	35
2.6.3	モジュール化のまとめ.....	37
2.7	ワイヤ干渉駆動の検証.....	38
2.8	ワイヤ干渉駆動の解析方法.....	45
2.9	まとめ.....	48

---

## 2.1 ワイヤ干渉駆動とは

多自由度の干渉駆動，干渉駆動のモジュール設計，さらにさまざまな状況に適する干渉駆動モジュールの開発を実現するには，干渉の基本的な特性と原理を理解する必要がある．そのため，干渉駆動の原理をはじめとした干渉駆動モジュールの分析が本節の重点である．

干渉は日常生活の中でよく発生する．例えば，自動車の差動装置と4輪の独立駆動の移動シャーシは干渉の一種の形式である．移動シャーシの4つの車輪が回転できないため，移動シャーシ全体の回転は4つの車輪の速度差によって実現された．ロボット領域において，干渉駆動とは，複数のアクチュエータが相互に影響し，制限された後，制御可能な運動を指す[30]．多くのロボットは干渉駆動を採用している．特にワイヤ駆動ロボットでは干渉駆動が非常に一般的である．

ワイヤ駆動には，全駆動型，冗長駆動型と劣駆動型がある．劣駆動は指関節によく使用され，指を物体の形に自動的に適応させ，形状の適応性が高い．また，アクチュエータも多くないため，劣駆動は軽い．しかし，各関節が独立して動くことができるロボットアームに対して，劣駆動はやや不十分である．ワイヤ駆動ロボットアームは，ほとんど全駆動または冗長駆動型を採用し，あらゆる自由度を正確に制御できる．全駆動または冗長駆動型においても，干渉ワイヤ駆動と非干渉ワイヤ駆動があり，冗長駆動型の場合，通常，干渉駆動である．非干渉全駆動方式は[31]，軽量且つ制御が簡単で，メンテナンスも便利であるという利点がある．しかし，外部からの大きな衝撃は関節アクチュエータを損傷し，肩関節に大きなトルクを必要とする関節のように，高出力のアクチュエータの使用が必須である．こうすれば，コストが上げられ，ボリュームも大きくされた一方，ロボットアームの総重量が減らされていない．干渉全駆動では，通常，アクチュエータの関節に近ければ近いほど，アクチュエータの干渉数も多くなり，末端関節に近ければ近いほど，アクチュエータ干渉数が少なくなり，さらにアクチュエータで直接駆動するようになる．このような干渉ワイヤ駆動の保守性が低い．一旦故障が発生すれば，全部分解して修理する必要があるため，精度は干渉のワイヤが長すぎることで下げられ，末端においても，大きな衝撃によるモーター損害の問題も生じてしまう．干渉冗長駆動[32] [33] [14]では，アクチュエータ数は関節

数より多い。これは、関節トルクを上げることができるが、アクチュエータも増やしたため、全体の機構が重くなる。

本論文の全駆動型ワイヤ干渉駆動とは、アクチュエータ数と関節の自由度数が同じでありながら、複数のモーターのトルクをワイヤで関節に融合させ、各関節が複数のモーターに駆動されるようになる。1つの関節内で、複数のモーターのモータートルクが融合し、必要に応じて各関節に分配されることを実現した。

## 2.2 角度からワイヤ干渉駆動の解析

本論文のワイヤ干渉駆動機構は、各モーターが少なくとも2つの関節と干渉することを意味する。このような干渉駆動が実現された後、ワイヤが機構の中で交差する必要があるかどうかを直感的に示すことができず、モーター角度と各関節角度の関係も見られない。したがって、迅速かつ正確にモデルを作ることができず、次の研究と制御に問題をもたらす。そこで本節は、ワイヤの位置変化からモーターと関節の角度の関係を導き出すことに重点を置く。

### 2.2.1 1個のモーターとn個の関節

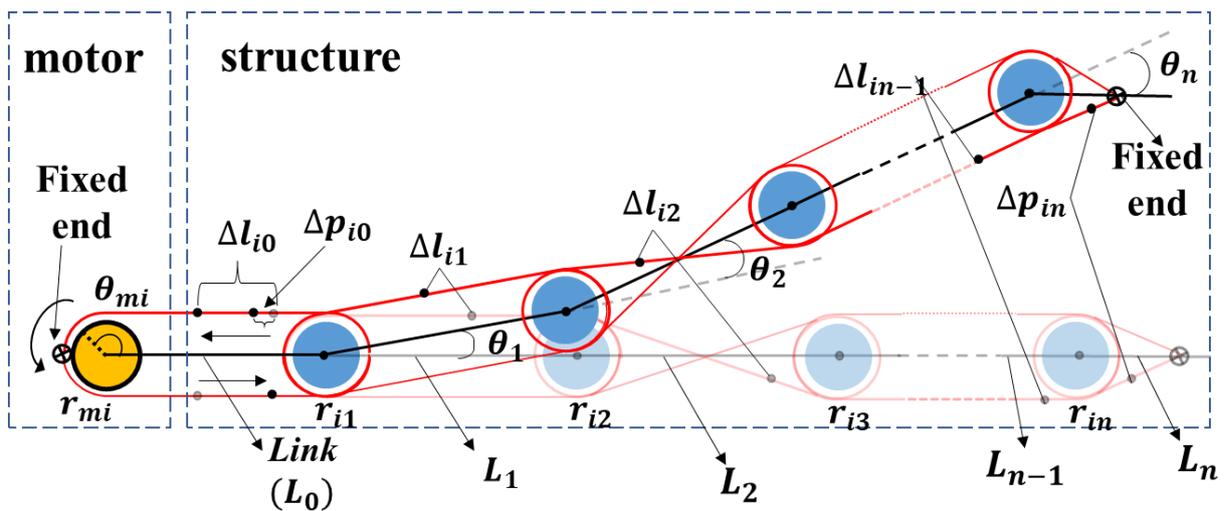


Fig. 2-1. Schematic diagram of one motor driving n joints.

ワイヤ干渉駆動におけるモーターと関節の角度関係を知るには、まず1つのモーターから複数の関節との角度関係を解析する必要がある。図2-1は1つのモーターとn個の関節の関係（ワイヤの長さ変化による各関節の角度変化）を示す図である。図の中の黄色の円はモータープーリーを示す。モータープーリーの半径は $r_{mi}$ で、 $\theta_{mi}$ はモーターの回転角度である。 $i$ はモーター番号 ( $i=1, 2, 3, \dots$ ) である。青色の円はモーター $i$ と関連する関節プーリー $r_{in}$ を示す。2つの関節プーリーの間を $L_n$ でリンクを表す。2本のワイヤの一方の端はモータープーリーに固定し、もう一方の端は最後の関

節のリンクに固定する。図の中の赤い実線は、ワイヤを表す。ワイヤ上の基準点を選択し、モーターが $\theta_{mi}$  ( $m$  はモーターを表す) の角度で回転すると、ワイヤ上の基準点の位置が変化し、各リンクの位置も変化する。 $\Delta l$  は基準点位置の変化量を示す。ただし、リンクの位置変化は、ワイヤの位置変化量と直接等しくすることはできない。それは、この変化量の中の一部は、ワイヤの弾性変形量になるからである。実際、ワイヤの弾性変形を引き起こす要因が複雑である。例えば、温度、湿度、加速度などの要因がある。ここで、 $\Delta p$  をワイヤの変形量とする。

モーターが図の示した方向に $\theta_{mi}$ 回転すると、ワイヤ上のマークされた点の位置変化量は $\Delta l_{ij}$  (隣接する2つのプーリーごとのワイヤの位置変化量) であり、対応するワイヤの弾性変形量は $\Delta p_{ij}$  である。 $j$  はリンク番号 ( $j=0, 1, 2, 3\dots$ ) を表す。弾性変形量は $\Delta p_{ij}$  は、完全に上の関節プーリーである出力端のプーリーによって提供される。したがって、モーターが $\theta_{mi}$  で回転すると、モータープーリー $\theta_{mi}$  と関節プーリー $r_{i1}$  の間のワイヤ位置変化量 $\Delta l_{i0}$  は、完全にモータープーリーによって提供され、このワイヤの弾性変形量は $\Delta p_{i0}$  である。このとき、ワイヤの位置変化量とモーターの角度の関係は次のとおりである。

$$\Delta l_{i0} = \theta_{mi} r_{mi} \quad (2.1)$$

反対側、つまり機構側では、ワイヤの位置変化量 $\Delta l_{i0}$  から対応するワイヤの弾性変形量 $\Delta p_{i0}$  を引いた後、一部は次のコネクティングの回転角度 $\theta_{L1}$  になり、残りの一部は次のワイヤの位置変化量 $\Delta l_{i1}$  になる。次のワイヤの位置変化量 $\Delta l_{i1}$  の中に、対応するワイヤの弾性変形量 $\Delta p_{i1}$  も含まれる。言い換えれば、実際のワイヤ駆動では、ワイヤの弾性変形により、基準点の移動が異なる。 $\Delta p_{ij}$  は関節プーリー間のワイヤ弾性変形量だと仮定し、図2-1の示すように、 $\Delta l_{ij}$  は $\Delta p_{ij}$  に含まれる。 $\Delta p_{ij}$  は遠位関節の動きに有利である。(式2-1)では、弾性変形量 $\Delta p_{i0}$  が $\Delta l_{i0}$  に含まれる。次に、関節1と2の間の基準点の移動を考えると、 $\Delta l_{i0}$  に含まれる弾性変形量 $\Delta p_{i0}$  は、動きに作用しないため、差し引く必要がある。回転角度 $\theta_1$ 、基準点移動 $\Delta l_{i0}$ 、 $\Delta l_{i1}$  の関係は次のように記述できる。

$$\Delta l_{i0} - \Delta p_{i0} = (-1)^{S_{i1}} r_{i1} \theta_1 + \Delta l_{i1} \quad (2.2)$$

ここで、 $(-1)^{s_{ij}}$ は関節間のワイヤルーティング方法を表す。ワイヤの回転は、基準点の移動方向を逆にする。  $s_{ij}$ は、モーターから  $j$  番目の関節までのワイヤの交差数の合計数を示す。

同様に、プーリー間のワイヤの動きは次のように説明できる。

$$\Delta l_{i1} - \Delta p_{i1} = (-1)^{s_{i2}} r_{i2} \theta_2 + \Delta l_{i2} \quad (2.3)$$

⋮

$$\Delta l_{i(n-1)} - \Delta p_{i(n-1)} = (-1)^{s_{in}} r_{in} \theta_n + \Delta p_{in} \quad (2.4)$$

リンク  $L_0$  から  $L_j$  までの式をまとめると、次のようになる。

$$\Delta l_{i0} - \Delta l_{ij} = \sum_{k=1}^j (-1)^{s_{ik}} r_{ik} \theta_k + \sum_{k=0}^{j-1} \Delta p_{ik} \quad (2.5)$$

(式 2.5) は、モーターの回転角度、ワイヤの任意のセクションの動き、および各関節の回転角度の間の一般的な関係である。

干渉駆動の実装では、ワイヤは通常、最後のプーリーまたはリンクに固定される。つまり、 $\Delta l_{in} = 0$ 。  $\Delta l_{i0}$  を  $\theta_{mi} r_{mi}$  に置き換えると、(式 2.6) は次のように簡略化できる。

$$\theta_{mi} r_{mi} = \sum_{k=1}^n (-1)^{s_{ik}} r_{ik} \theta_k + \sum_{k=0}^n \Delta p_{ik} \quad (2.6)$$

## 2.2.2 n 個のモーターと n 個の関節

本論文の干渉駆動では、モーター数は関節数と同じである。干渉駆動の一般性を研究するため、2.3.1 の中の一つのモーターが  $n$  個の関節に対応するのに対して、本論文は  $n$  個のモーターと  $n$  個の関節に拡大した。

図 2-2 は、 $n$  個の関節を駆動する  $n$  個のモーターを示す図である。図の文字は図 2-1 のアルファベットの意味と同じである。アルファベット  $j$  は関節,  $\theta$  は関節角度, 黒い点線は関節の位置を表す。(式 2.6) と組み合わせると, ワイヤ干渉駆動を表す一般式は次のようにまとめられる。

$$\begin{bmatrix} \theta_{m1} r_{m1} \\ \theta_{m2} r_{m2} \\ \vdots \\ \theta_{mn} r_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n (-1)^{s_{1k}} r_{1k} \theta_k + \sum_{k=0}^n \Delta p_{1k} \\ \sum_{k=1}^n (-1)^{s_{2k}} r_{2k} \theta_k + \sum_{k=0}^n \Delta p_{2k} \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n (-1)^{s_{nk}} r_{nk} \theta_k + \sum_{k=0}^n \Delta p_{nk} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

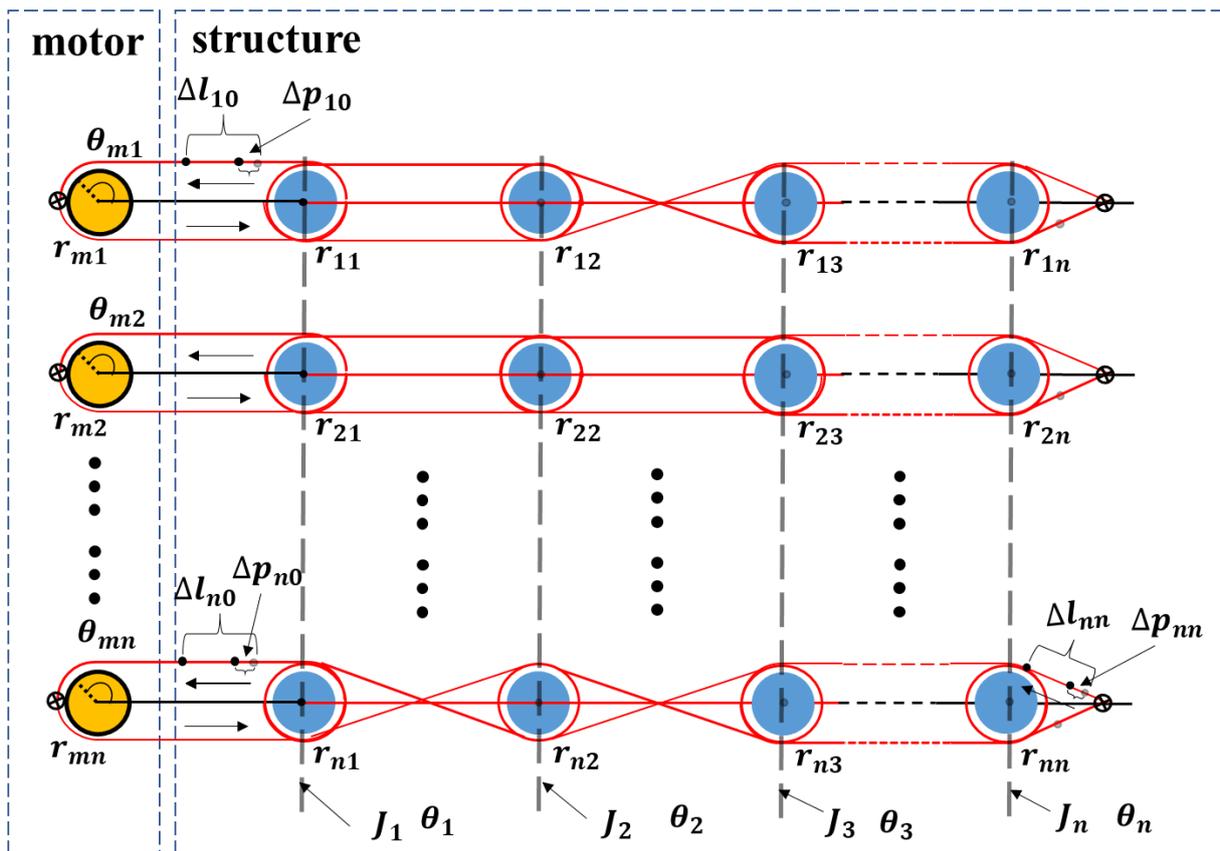


Fig. 2-2. Schematic diagram of  $n$  motor driving  $n$  joints(angle).

(式 2.7) を簡略化する.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \\ \vdots \\ \theta_{mn} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (-1)^{S_{11}} & (-1)^{S_{12}} & \cdots & (-1)^{S_{1n}} \\ (-1)^{S_{21}} & (-1)^{S_{22}} & \cdots & (-1)^{S_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-1)^{S_{n1}} & (-1)^{S_{n2}} & \cdots & (-1)^{S_{nn}} \end{bmatrix} \odot \mathbf{1} \\
 \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} 1/r_{m1} & 1/r_{m1} & \cdots & 1/r_{m1} \\ 1/r_{m2} & 1/r_{m2} & \cdots & 1/r_{m2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/r_{mn} & 1/r_{mn} & \cdots & 1/r_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^n \frac{\Delta p_{1k}}{r_{m1}} \\ \sum_{k=0}^n \frac{\Delta p_{2k}}{r_{m2}} \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^n \frac{\Delta p_{nk}}{r_{mn}} \end{bmatrix} & \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

したがって,

$$\boldsymbol{\theta}_m = \mathbf{S} \odot \mathbf{R} \odot \mathbf{R}_m \boldsymbol{\theta} + \Delta \mathbf{P}(l, f) \quad (2.9)$$

ここで,  $\boldsymbol{\theta}_m$  はモーターの角度である.  $(-1)^{S_{ij}}$  は  $\mathbf{S}$  の中の要素であり,  $S_{ij}$  はワイヤが  $i$  番目のモーターから  $j$  番目の関節プーリーまで交差する回数を表す. つまり,  $\mathbf{S}$  はワイヤが交差するかどうか, または交差する回数を表し, 対応する関節プーリーの回転方向も表す.  $\mathbf{R}$  は関節プーリーで,  $\mathbf{R}_m$  はモータープーリーである.  $\boldsymbol{\theta}$  は関節の角度を表す.  $\Delta \mathbf{P}(l, f)$  の中に  $l$  と  $f$  はそれぞれワイヤの長さと言力である. 得られた(式 2.9) は, ワイヤ干渉駆動の一般式である.

<sup>1</sup>  $\odot$  アダマール積 (英: Hadamard product) は, 同じサイズの行列に対して成分ごとに積を取ることによって定まる行列の積である.

### 2.3 トルクからワイヤ干渉駆動の解析

本節では、トルクからワイヤ干渉駆動を解析する。角度を解析する場合、プーリー角度は関節角度を表すため、1つのモーターは  $n$  個の関節に対応し、 $n$  個のモーターは  $n$  個の関節に対応するように拡張できる。ただし、トルクが異なり、モータートルクが各関節にどのように分布しているかを事前に知ることができないため、全体として解析する必要がある。言い換えれば、各関節トルクはいくつの部分で構成されているかを解析してから、 $n$  個のモーターと  $n$  個の関節に拡張する。

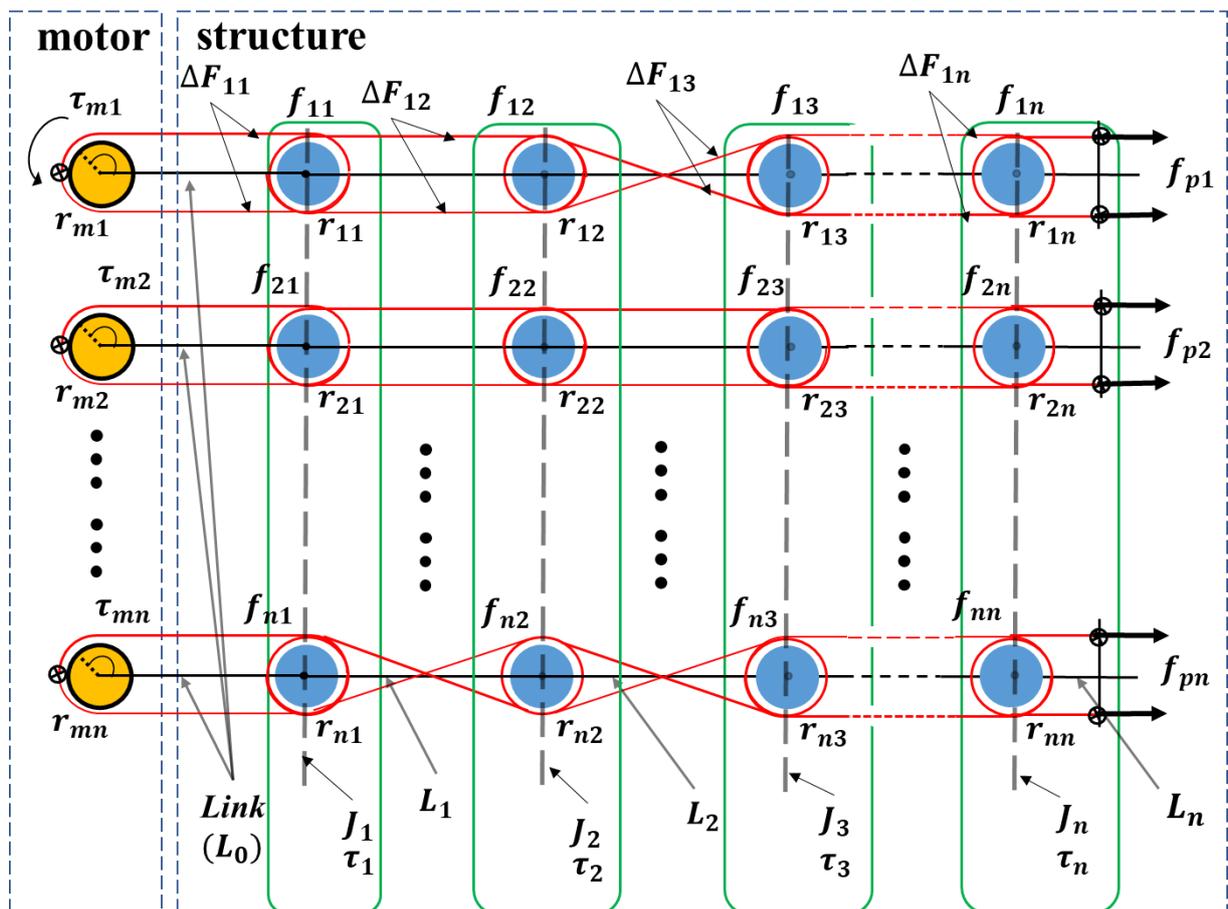


Fig. 2-3. Schematic diagram of  $n$  motor driving  $n$  joints (Torque)

角度の解析図と図 2-2 は似ていて、角度に関する記述情報を削除し、トルクに関する記述情報を追加した。図 2-3 に示すように、黄色の円はモータープーリー、青い円

は関節プーリー，関節プーリーの中心は関節の回転軸，リンクは2つの回転軸を結ぶ剛体を表し， $L_j$ で表される． $r_{mi}$ と $\tau_{mi}$ はそれぞれ  $i$  号モータープーリーの半径と  $i$  号モーターのトルクを表す． $r_{ij}$ は関節プーリーで， $i$  と  $j$  はそれぞれモーター番号と関節番号である． $f_{pi}$ は， $i$  号モーターのワイヤの予荷重力で， $f_{ij}$ は，対応する関節プーリー $r_{ij}$ の摩擦力を表す． $\Delta F_{ij}$ は，隣接する2つのプーリー間の引張力の差を示す． $J_j$ と $\tau_j$ はそれぞれ関節  $j$  と関節  $j$  のトルクを示す．

まず，モーター1の2本ワイヤの引張力と，モーター1に関連する関節プーリーの引張力を解析する．各モーターにある2本のワイヤは，それぞれ反対方向で異なる関節の関節プーリーにルーティングする．ワイヤの一端をモーター1に固定し，反対方向で各関節プーリーに巻き付け，最後に末端に固定する．理論的には，摩擦を考慮しない場合，モーターのトルクは損失なく最後の関節プーリーに伝達される．言い換えれば，隣接する2つのプーリーごとに，ワイヤ引張力の差 $\Delta F_{1j}$ が等しい．摩擦 $f_{1j}$ を考慮すると， $\Delta F_{1j}$ は次のようになる．

$$\Delta F_{11} = \tau_{m1}/r_{m1} \quad (2.10)$$

$$\Delta F_{12} = \Delta F_{11} - f_{11} \quad (2.11)$$

$$\Delta F_{13} = \Delta F_{12} - f_{12} \quad (2.12)$$

⋮

$$\Delta F_{1n} = \Delta F_{1(n-1)} - f_{1(n-1)} \quad (2.13)$$

その中， $\Delta F_{10}$ は，モーター1が回転するときに発生する引張力を直接表すことができる．それは， $\Delta F_{10}$ は関節プーリー $r_{11}$ との間のリンク $L_0$ が動かないからである．

予荷重力の問題 $f_{p1}$ について、予荷重力は、機構が静止状態にあるとき、先にワイヤに張力を発生させ、モーターが回転する時に関節が回転しないことを防ぐ。予荷重力により、関節はモーターの回転によく追従し、誤差を減らすことができる。予荷重力は機構の内力であるため、ワイヤの引張力差を計算する際にキャンセルされる。

次に、関節1のトルク $\tau_1$ を解析する。関節1は $r_{11}$ から $r_{n1}$ の $n$ 個のプーリーで構成され、これらの $n$ 個のプーリーはそれぞれ $n$ 個のモーターによって駆動される。したがって、関節1のトルク $\tau_1$ は次のように書ける。

$$\tau_1 = (\Delta F_{11} - f_{11}) \cdot r_{11} + (\Delta F_{21} - f_{21}) \cdot r_{21} + \dots + (\Delta F_{n1} - f_{n1}) \cdot r_{n1} \quad (2.14)$$

関節2のトルク $\tau_2$ は、モーター $r_{mi}$ が対応する関節プーリー $r_{i2}$ に対するトルクの合計である。

$$\tau_2 = (\Delta F_{12} - f_{12}) \cdot r_{12} + (\Delta F_{22} - f_{22}) \cdot r_{22} + \dots + (\Delta F_{n2} - f_{n2}) \cdot r_{n2} \quad (2.15)$$

第 $n$ 個の関節トルクは以下である。

$$\tau_n = (\Delta F_{1n} - f_{1n}) \cdot r_{1n} + (\Delta F_{2n} - f_{2n}) \cdot r_{2n} + \dots + (\Delta F_{nn} - f_{nn}) \cdot r_{nn} \quad (2.16)$$

まとめれば、以下になる：

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n (-1)^{S_{k1}} \frac{\tau_{mk}}{r_{mk}} r_{k1} - \sum_{k=1}^n f_{k1} r_{k1} \\ \sum_{k=1}^n (-1)^{S_{k2}} \frac{\tau_{mk}}{r_{mk}} r_{k2} - \sum_{k=1}^n f_{k1} r_{k2} - \sum_{k=1}^n f_{k2} r_{k2} \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n (-1)^{S_{kn}} \frac{\tau_{mk}}{r_{mk}} r_{kn} - \sum_{k=1}^n f_{k1} r_{kn} - \sum_{k=1}^n f_{k2} r_{kn} - \dots - \sum_{k=1}^n f_{kn} r_{kn} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

(式 2.17) は以下のように書ける :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (-1)^{s_{11}} & (-1)^{s_{21}} & \cdots & (-1)^{s_{n1}} \\ (-1)^{s_{12}} & (-1)^{s_{22}} & \cdots & (-1)^{s_{n2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (-1)^{s_{1n}} & (-1)^{s_{2n}} & \cdots & (-1)^{s_{nn}} \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & \cdots & r_{n1} \\ r_{12} & r_{22} & \cdots & r_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1n} & r_{2n} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \odot \\
 &\quad \begin{bmatrix} 1/r_{m1} & 1/r_{m2} & \cdots & 1/r_{mn} \\ 1/r_{m1} & 1/r_{m2} & \cdots & 1/r_{mn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/r_{m1} & 1/r_{m2} & \cdots & 1/r_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \\ \vdots \\ \tau_{mn} \end{bmatrix} - \\
 &\quad \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n f_{k1} r_{k1} \\ \sum_{k=1}^n f_{k1} r_{k2} + \sum_{k=1}^n f_{k2} r_{k2} \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n f_{k1} r_{kn} + \sum_{k=1}^n f_{k2} r_{kn} + \cdots + \sum_{k=1}^n f_{kn} r_{kn} \end{bmatrix} \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

式 2.18 をまとめれば、以下になる :

$$\mathbf{T} = \mathbf{S} \odot \mathbf{R} \odot \mathbf{R}_m \mathbf{T}_m - \boldsymbol{\tau}(\mathbf{r}_{ij}, f) \quad (2.19)$$

(式 2.19) では、 $T$  は関節トルクで、 $s$  は各モーターから  $T$  までの関節の間のワイヤの交差回数である。 $R$  は関節プーリーの半径を表し、 $R_m$  はモータープーリーの半径で、 $\boldsymbol{\tau}(\mathbf{r}_{ij}, f)$  は各関節にある摩擦の関数である。

## 2.4 ワイヤルーティング行列

(式 2.8) と (式 2.18) を比較すると、 $S$  と  $s$  はワイヤ交差回数を表す行列であり、それらは転置行列の関係であることがわかる。関節プーリー行列  $R$  と  $\hat{R}$ 、モータープーリー行列  $R_m$  と  $\hat{R}_m$  は、すべて転置行列の関係である。ワイヤ交差回数行列、関節プーリー行列、モータープーリー行列を、行列  $A$  表示する：

$$A = S \odot R \odot R_m \quad (2.21)$$

$A$  行列を、ルーティング行列 (motor-joint routing matrix) と呼び、ワイヤのルーティングとプーリーの位置を表示する行列である。効率的に研究するため、ワイヤの弾性変形と摩擦力を考慮せずに、(式 2.9) と (式 2.19) は次のように書ける。

$$\theta_m = A\theta \quad (2.22)$$

$$T = A^T T_m \quad (2.23)$$

(式 2.22) と (式 2.23) から、(式 2.24) と (式 2.25) が得られる：

$$T_m = (A^T)^{-1} T \quad (2.24)$$

$$\theta = A^{-1} \theta_m \quad (2.25)$$

(式 2.22) から (式 2.25) は、この  $n$  自由度のワイヤ干渉駆動の性質をまとめて説明している。この  $n$  自由度のワイヤ干渉駆動は、 $n$  個のモーターによって  $n$  個の関節を駆動し、モータートルクの  $T_m = [\tau_{m1}, \tau_{m2}, \dots, \tau_{mn}]^T$  と関節トルクの  $T = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$  との関係は、(式 2.23) と同じ形式で記述できる。モーター角度の  $\theta_m = [\theta_{m1}, \theta_{m2}, \dots, \theta_{mn}]^T$  と関節角度の  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$  との関係は (式 2.25) と同じ形式で書ける。その中で、 $A^T$  と  $A^{-1}$  は、関節プーリーの位置とワイヤのルーティング方法を表す正規行列である。関節  $j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) のみが駆動される場合、 $T_m^j = [\tau_{m1}^j, \tau_{m2}^j, \dots, \tau_{mn}^j]^T$  と  $\theta_m^j = [\theta_{m1}^j, \theta_{m2}^j, \dots, \theta_{mn}^j]^T$  が次の式を満たす。

$$\begin{bmatrix} \theta_{m1}^1 & \theta_{m1}^2 & \dots & \theta_{m1}^n \\ \theta_{m2}^1 & \theta_{m2}^2 & \dots & \theta_{m2}^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{mn}^1 & \theta_{mn}^2 & \dots & \theta_{mn}^n \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \begin{bmatrix} \theta_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \theta_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \theta_n \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{m1}^1 & \tau_{m1}^2 & \dots & \tau_{m1}^n \\ \tau_{m2}^1 & \tau_{m2}^2 & \dots & \tau_{m2}^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tau_{mn}^1 & \tau_{mn}^2 & \dots & \tau_{mn}^n \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \begin{bmatrix} \tau_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \tau_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \tau_n \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

(式 2.26) は、関節  $j$  のみが角度  $\theta_j$  で回転する場合、各モーターは角度  $\theta_{mi}^j$  で回転する必要があることを示している。ここで、 $i$  はモーター番号で、 $j$  は関節番号である。同様に、(式 2.27) は、関節  $j$  のみが  $\tau_j$  トルクを持っている場合、各モーターがトルク  $\tau_{mi}^j$  を出力する必要があることを示している。

(式 2.22) では、ワイヤルーティング行列  $\mathbf{A}$  の  $j$  番目の列は、関節  $j$  号のみが回転するときの各モーターの回転角度の比率を意味する。(式 2.24) では、ワイヤルーティング行列  $(\mathbf{A}^T)^{-1}$  の  $j$  番目の列は、関節  $j$  号のみがトルクを生成するときの各モーターの出力の必要なトルク比を意味する。

上記の解析から、本論文のワイヤ干渉駆動は、複数のモーターのトルクがワイヤによって集中され、特定の割合で各関節に分散されることを意味し、単一の関節のトルクを増加させる可能性があることがわかる。そして、この比率は、ワイヤ交差回数行列  $\mathbf{S}$  と関節プーリー行列  $\mathbf{R}$  によって決定される。モータープーリーと関節プーリーの半径の比率によって、トルク配分前の機構に統合されるトルクの量が決まる。

## 2.5 本論文のワイヤ干渉駆動

この論文の干渉駆動は、モーターの数がジョイントの数に等しく、各関節のトルクが少なくとも2つのモーターによって提供される。本論文の干渉駆動機構を実現するには、次の条件を満たす必要がある。

1. 関節の数はアクチュエータの数と等しくなる必要がある。つまり、ワイヤルーティング行列  $A$  は正規行列でなければならない。

2. ワイヤクロス行列  $S$  と関節プーリー行列  $R$  は逆行列でなければならない。

3. 関節プーリー行列  $R$  には、複数の  $0$  要素の存在が可能である。これは、対応する位置にプーリーがないことを意味する。各行または列では、 $0$  の数は2以上にする必要がある。

上記の条件を満たすワイヤ駆動は、必ずしも最適な干渉結果ではない。具体的な内容について、次の章で解析する。

## 2.6 モジュールの必要性

先行研究では、ワイヤ駆動の長所と短所を要約し、ワイヤ干渉駆動を使用してロボットのトルクを増加させ、自重を減らす。しかし、保守性と精度の問題はまだ解決されていない。本節では、上記の問題を解決するために、モジュール化設計の必要性について述べる。

### 2.6.1 モジュール化—精度の向上

(式 2.8) と (式 2.18) から整理した誤差項は以下になる：

$$\begin{bmatrix} \theta_{e1} \\ \theta_{e2} \\ \vdots \\ \theta_{en} \end{bmatrix} = (\mathbf{S} \odot \mathbf{R} \odot \mathbf{R}_m)^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^n \frac{\Delta p_{1k}}{r_{m1}} \\ \sum_{k=0}^n \frac{\Delta p_{2k}}{r_{m2}} \\ \vdots \\ \sum_{k=0}^n \frac{\Delta p_{nk}}{r_{mn}} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{e1} \\ \tau_{e2} \\ \vdots \\ \tau_{en} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n f_{k1} r_{k1} \\ \sum_{k=1}^n f_{k1} r_{k2} + \sum_{k=1}^n f_{k2} r_{k2} \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^n f_{k1} r_{kn} + \sum_{k=1}^n f_{k2} r_{kn} + \cdots + \sum_{k=1}^n f_{kn} r_{kn} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

(式 2.28) と (式 2.29) は機構の誤差項である。誤差項から、誤差は主にワイヤの弾性変形に起因することがわかる。誤差項にはモータープーリーと関節プーリーが含まれるが、実際にはトルク伝達の大きさを表す。モーターのトルクが大きければ大きいほど、ワイヤに対する引張力が大きくなり、引張力によるワイヤの形変量も大きくなる。逆では、形変量が小さくなる。

機構の精度を上げるためには、ワイヤの長さをできるだけ短くするか、または予荷重力を大きくすることが有効である。ワイヤの長さを短くするには、干渉された関節の数を減らす必要がある。予荷重力の大きさは関節トルクに影響を与えないことがわ

かるが、予荷重力が大きければ大きいほど、機構の強度に対する要求が高くなる。加えて、予荷重力が大きくなる時、誤差が減るが、ワイヤの耐久性も低下する。

一方、(式 2.19) から、機構の摩擦は各関節に異なる影響を与えることがわかる。各関節の摩擦は、前の関節の摩擦を累積する。最後の関節が動くと、克服される摩擦は、機構内のすべての関節摩擦の合計になる。したがって、摩擦の観点から、あまりにも多くの関節が干渉することに適していない。

## 2.6.2 モジュール化—メンテナンス性の向上

現にあるロボットアームの駆動方法を要約し、ワイヤ駆動がサービスロボットや、人間とコンピューターの頻繁な相互作用を必要とするロボットで広く使用されていることについて説明した。波動歯車伝動方法は、産業用ロボットでよく使用される。ロボットアーム内のモーターの位置を図 2-4 にまとめる。

図 2-4 (a) で示す形式は産業用ロボットによく見られる。それらはモーターで直接駆動する方法または波動歯車を使用する。いずれにしても、モーターは通常、関節に取り付けられる。モーターで直接駆動されるロボットアームの欠点は、関節トルクが小さすぎることである。波動歯車を使用する場合、ロボットアームの自重が大きすぎる。それらの利点は、機構が複雑でなく、メンテナンスが比較的簡単であるということである。

図 2-4 (b) に示す方法は一つの干渉駆動の方法で、多数のワイヤ干渉駆動のロボットアームが使用する方法でもある。この方法はすべてのモーターまたはアクチュエータをロボットアームのベースに配置し、ワイヤによってトルクを各関節に伝達させる。可動部品の重量と慣性モーメントが減らせられることは、この機構の最大な利点である。この利点によって、可動部品の応答と速度が速くなる。ただし、長すぎるワイヤが2つの問題を生じさせてしまう。第一に、ワイヤが長すぎると、外力によりワイヤの形変量が大きくなり、ロボットアームの精度が低下してしまうことである。第二に、アクチュエータはすべて固定端に配置され、ワイヤがアーム全体を通過するため、破

損した場合はロボットアームを完全に分解して再度取り付ける必要があり、メンテナンスが容易ではないことである。

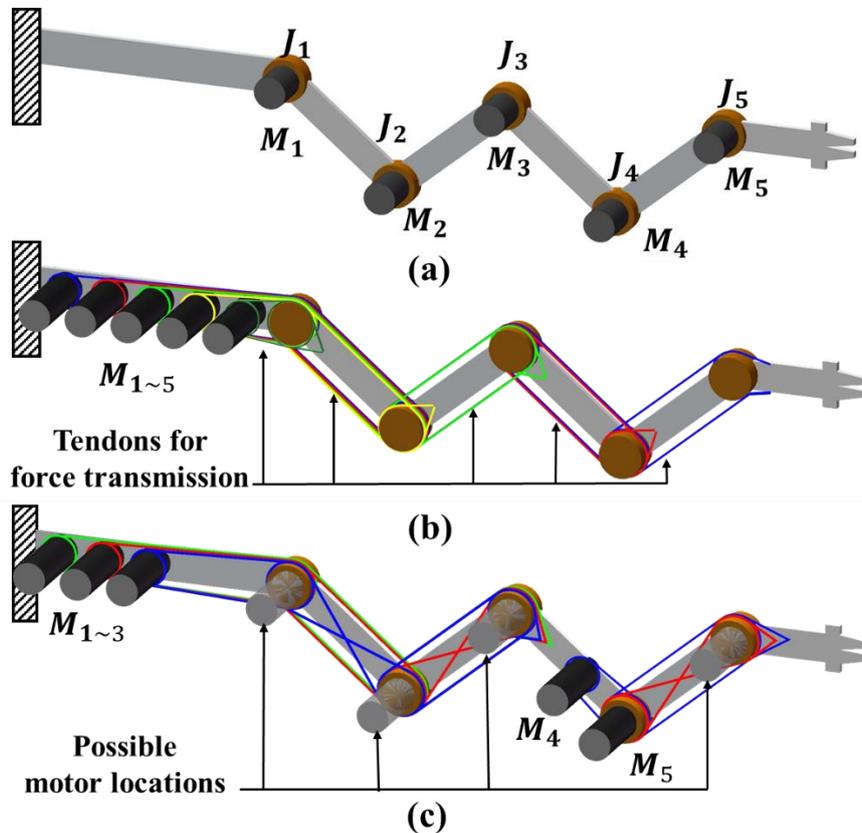


Fig. 2-4. Conceptual structures of robotic arms (a), Harmonic gear or direct drive structure. (b) tendon driven structure, (c) Modularized tendon driven structure

図 2-4 (c)に示されたのは、本論文のモジュール化ロボットアームの概念図であり、市販されているワイヤ干渉駆動ロボットアームでも類似の設計がある。この形式では、一部のモーターまたはアクチュエータは、関節に近づくように別々に配置される。灰色は、モーターの可能な位置を表す。この形式の利点は次のとおりである。第一に、モーターから関節までのワイヤの距離が短くなり、弾性変形による誤差も低くなり、精度が高くなる。第二に、自由度の高い設計で、重心や大きさのニーズに合わせてモーターを任意の位置に配置できる。第三に、モジュール化設計により、損傷したモジュールを迅速に交換でき、保守性が向上される。

本論文では、モジュール化設計を使用してロボットアームの保守性を向上した。新たな3モーター3自由度と2モーター2自由度のワイヤ干渉駆動モジュールをそれぞれ開発し、関節トルクを上げた。

### 2.6.3 モジュール化のまとめ

以上のように、モジュール化設計はモーターと関節の間の距離を短くすることができ、それによってワイヤの長さも短くなる。これによりワイヤの弾性変形による誤差が減少する。さらに式(2.28)によって、モジュール化によってロボットアームの精度を向上させることができる。一方式(2.29)から、機構の摩擦は各関節に異なる影響を与えることがわかる。各関節の摩擦は前の関節の摩擦を累積するため、末端の関節が動くときに発生する摩擦は、機構内のすべての関節摩擦の合計である。したがって、摩擦の観点から、あまりにも多くの関節が干渉することは望ましくない。

## 2.7 ワイヤ干渉駆動の検証

本節までは、まず干渉駆動モジュールのルーティング方法について説明した。また、角度とトルクから、一般式の導出過程を解析した、しかし、各関節トルクとモータートルクの関係性を明らかにするのは容易ではないため、本節では、モーターの電流フィードバックを採用し、機構の有効性に対してさらなる検証をする。

まず、検証のため実験用の2モーター2自由度干渉駆動モジュールを開発した（図2-5 a）。2つのワイヤはモータープーリー $r_{m1}$ に固定され、もう2つのワイヤはモータープーリー $r_{m2}$ に固定される。この干渉駆動モジュールは、そのうちにある1つの関節の回転軸と同軸になることである（本機構では、モーター $r_{m1}$ と $r_{m2}$ の回転軸は関節 $J_2$ と同軸になる）。ワイヤは同じルーティング方向でモータープーリー $r_{m1}$ と $r_{m2}$ にルーティングし、反対方向で関節 $J_1$ の2つの関節プーリーにルーティングする。最後に、図2-5(b)に示す中空ネジにワイヤを固定する。この中空ネジの機能は、ワイヤの引張力を調整する。

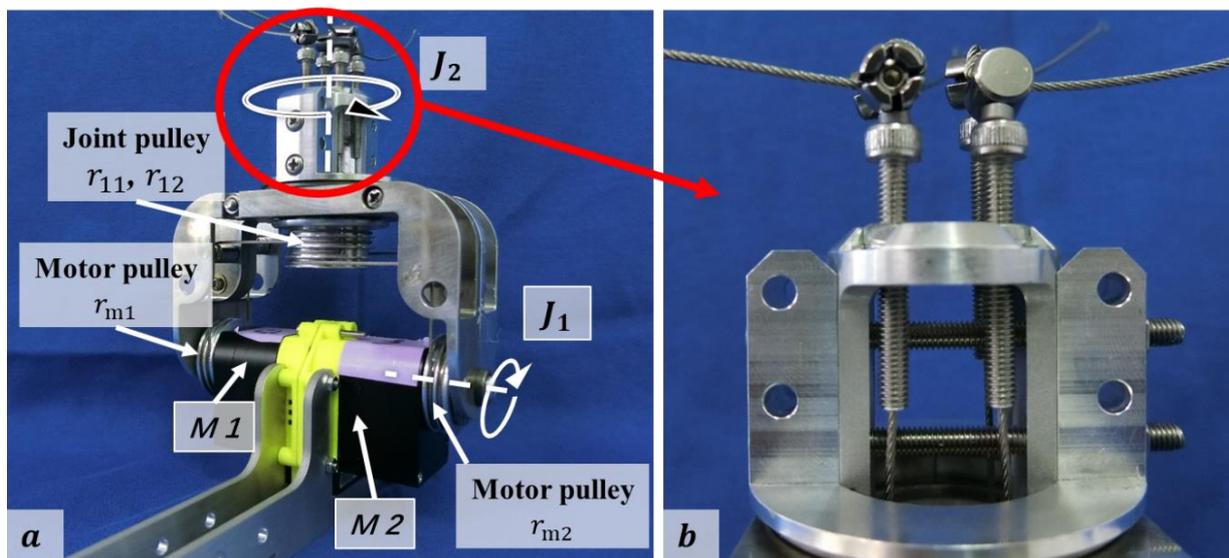


Fig. 2-5. A verification structure with 2 motors and 2 DoF coupled tendon driven

この機構では、モーターが関節と同軸であるため、関節 $J_2$ が回転し、 $J_1$ が回転しない時、2つのモーターの回転子が回転する。モーターのトルクをワイヤの引張力に変え、

関節 $J_2$ の関節プーリーに伝導する。つまり、モーターの回転子が回転する時、関節 $J_1$ が静止する。一方、関節 $J_2$ が回転せず、 $J_1$ が回転する時、関節 $J_2$ 中にワイヤのパワーバランスを維持するための、ワイヤの長さ変化は起きず、関節 $J_2$ は回転しない。そのため、2つのモーターの回転子は静止する。上記の解析から、1つの特別な動作方法を開発しなければならないことがわかる。モーターは一つの関節と共に回転する必要がある。つまり、モーターの回転子が回転する時に1つの自由度になり、固定子が回転する時にもう1つの自由度になる。したがって、本機構では、モーターが反対方向で回転すると、2つのモーターは一緒に固定される。そして、関節 $J_1$ 中にワイヤのパワーバランスを維持するための、モーターの回転子が回転すると、関節 $J_2$ も回転させる。モーターが同方向で回転する時、関節 $J_2$ 中にワイヤのパワーバランスを維持する。そして、モーターの回転子が静止し、モーターの固定子が回転し、関節 $J_2$ を回転させる。

上記の解析により、このワイヤ干渉駆動機構では、2つのモーターがあり、駆動される関節の数は2つであることがわかる。モータープーリーの半径 $r_{mi}$ は、関節プーリーの半径 $r_{ij}$ と同じである。ワイヤルーティングの問題について、機構ではワイヤが実際に交差していないが、2つのモーターから始まるワイヤが、左右の両側から関節に巻き付け、2つのモーターが同じ方向に回転すると、関節1への2つのモーターの回転方向が逆になる。つまり、1つのモーターのワイヤと関節1の間にクロスがあったというふうに理解できる。(式2.21)を組み合わせると、このワイヤ機構のワイヤルーティング行列 $A$ は次のようにまとめられる。

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

(式2.26)と(式2.27)によれば、任意の関節が回転すれば、関節の出力トルクはモーターのトルクの2倍になると解析できる。この結果を検証するために、消費電流実験を行った。

同じ負荷をそれぞれ2モーター2自由度干渉駆動モジュールと1モーター1自由度干渉駆動モジュールに置き、負荷が当該回転中心までの距離が同じである場合、2モーター2自由度干渉駆動モジュールにおける各モーターの電流は1モーター1自由度

関節におけるモーターの電流の半分だと想定する．そうすると，この機構における各自由度は2倍のモータートルクに達していると言える．

図 2-6 は実験の写真である．(a) は実験用の 2 モーター 2 自由度干渉駆動モジュールで，(b) は 1 モーター 1 自由度モジュールの対比写真である．関節回転中心まで 10cm ～60cm の場所に 550g の重荷と 900g の重荷をそれぞれ配置する．接地に垂直なときに，関節を  $0^\circ$  として開始し， $110^\circ$  まで回転させる．そして， $110^\circ$  を維持しながら，置かれた重荷が回転中心から 10cm で始まって，各追加 5cm での消費電流をそれぞれ記録する．図 2-6 と 2-7 に示されたのは，50cm の場所で 550g の重荷が置かれた時の状況である．

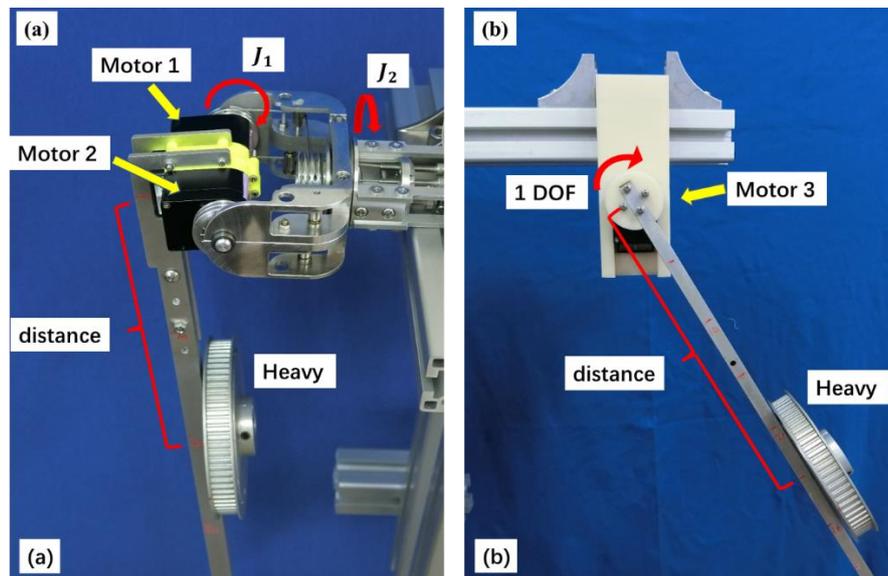


Fig. 2-6. Experiment system for comparison. (a): 2M2D tendon-driven. (b): 1M1D directly-actuated joint module

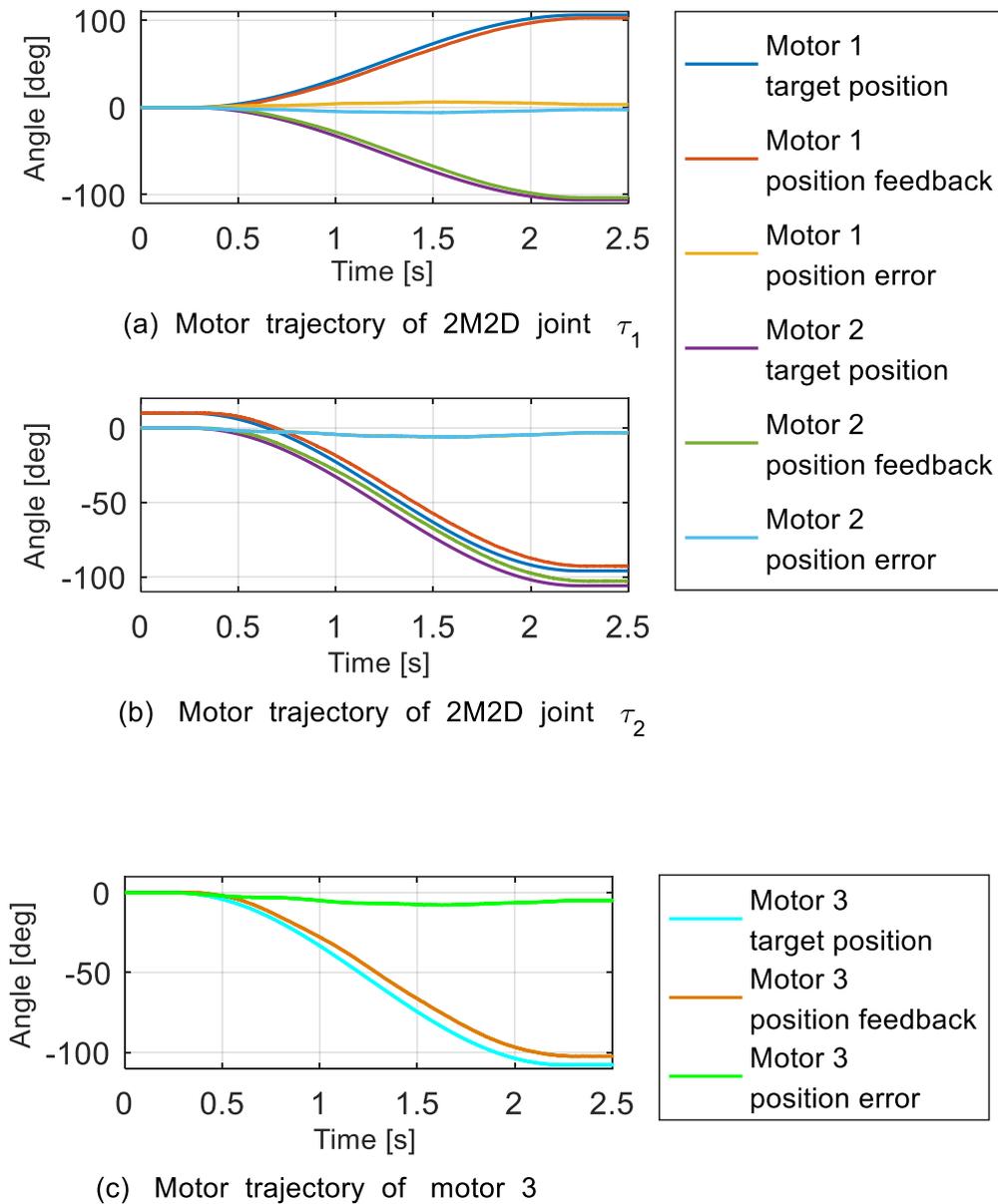


Fig. 2-7. Motor position and error

図 2-7 (a) では、実験用機構が関節 $J_1$ のところに回転する時、モーター1 とモーター2 の位置及び位置の誤差を表す。関節 $J_1$ が回転すると、モーター1 とモーター2 の回転方向が対向していると判定され、次の図に示すモーター軌跡がある。(b)では、実験用機構が関節 $J_2$ の回転する時、モーター1 とモーター2 の位置及び位置の誤差を表す。関節 $J_2$ が回転すると、モーター1 とモーター2 の回転方向が同じであると判断され、モ

ーター位置フィードバックが完全に一致する．観察を容易にするため，モーター1の初期位置を  $10^\circ$  から回転開始として， $120^\circ$  まで停止すると決める．そして，上図 2-6 (a) に示す位置フィードバックがある．(c) では，1 モーターが直接関節を駆動する際，モーター3 の位置及び位置の誤差を示す．

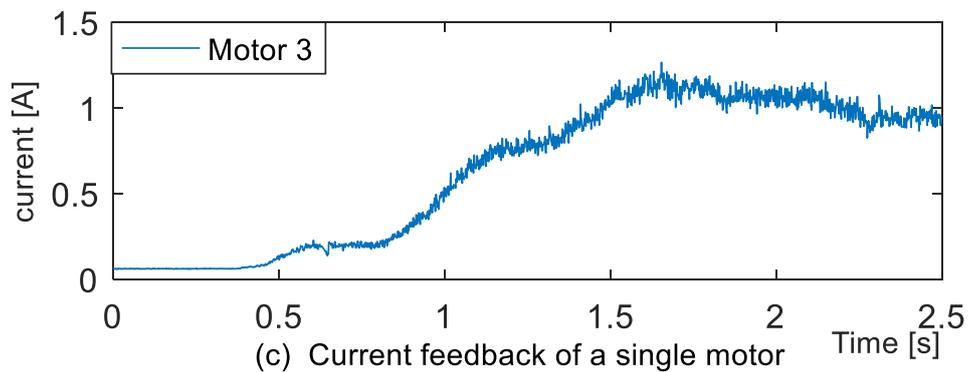
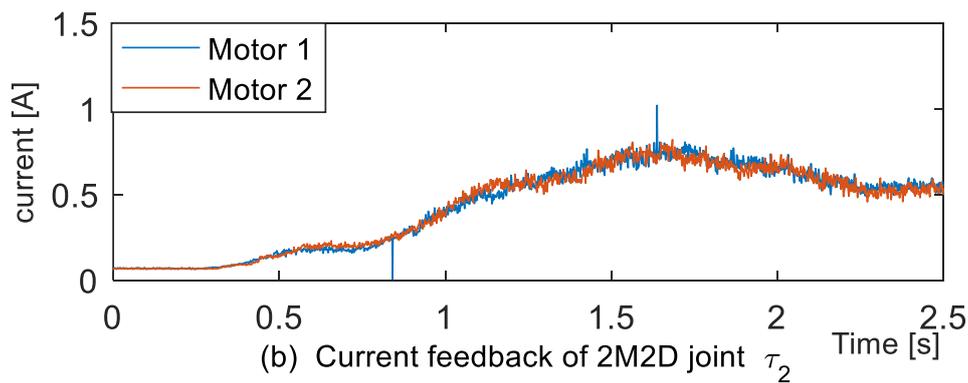
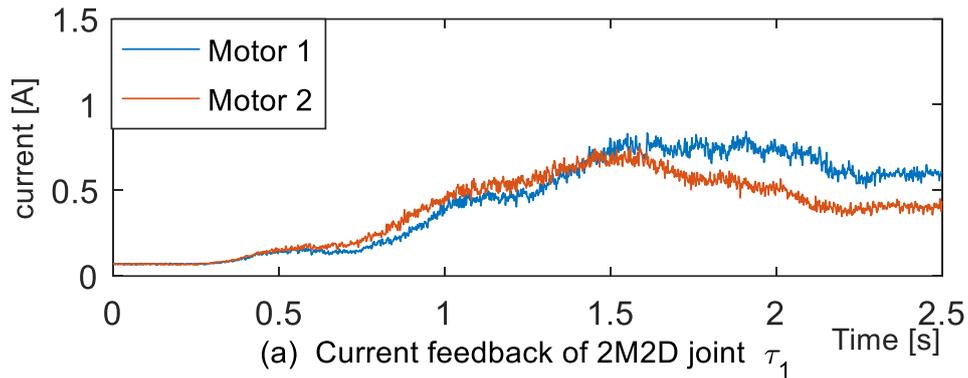
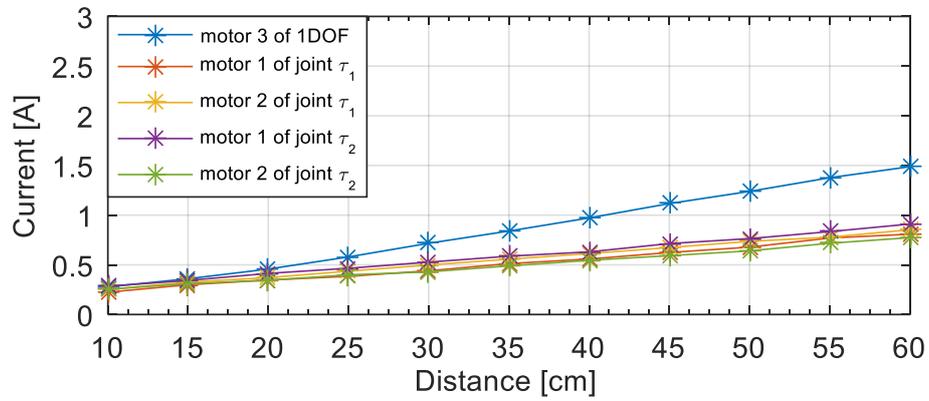


Fig. 2-8. Motor consumption current

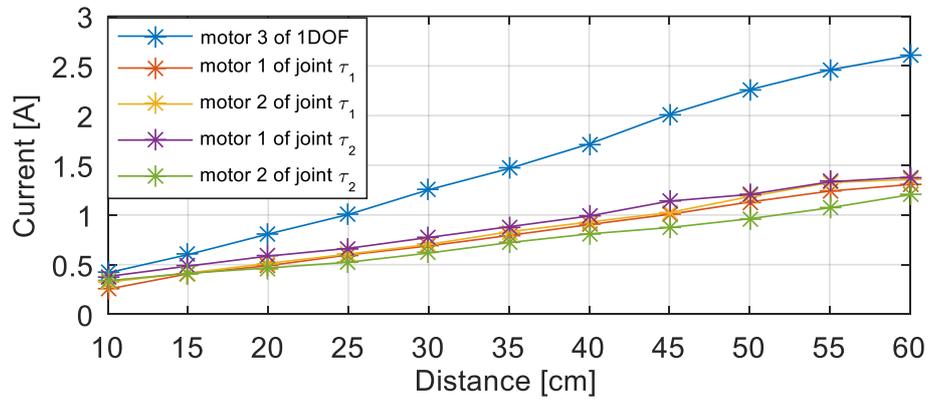
図 2-9 はモーターの消費電流である。消費電流から見れば、1 モーター 1 自由度では、モーター3 の電流の変化はほとんど 2 モーター 2 自由度干渉駆動モジュールにおけるモーターの電流の 2 倍になる。それは、消費電流から機構の出力トルクを検証することの実効性も示されている。

そして容易に観察するため、それぞれ異なった場所に置かれた 550g と 900g の重荷の消費電流を用い、また、同じ時間の 1.5 s から 2 s の間の平均値を取り、図 2-8 に示す電流対比図を描く。

図 2-9 の結果から見れば、同じ条件のもと、2 モーター 2 自由度干渉駆動モジュールにおけるモーターの電流は 1 モーター 1 自由度機構におけるモーター、消費電流の半分になるということが分かる。したがって、これは 2 つの内容の証明ができた。本実験結果の仮想のことで、2 モーター 2 自由度干渉駆動モジュールの出力トルクは 2 倍のモータートルクのことである。



(a) Current feedback of 550g load



(b) Current feedback of 900g load

Fig. 2-9. Current comparison

## 2.8 ワイヤ干渉駆動の解析方法

2.3節と2.4節は、それぞれ角度とトルクからワイヤ干渉駆動に導いた。しかし、ワイヤ干渉駆動機構（既知の行列によって機構を開発する）を実現する方法、または実現されたワイヤ干渉駆動（既知の機構によって行列を書く）を解析する方法は簡単ではない。モーターと関節の関係を解析し、開発した機構が予想通りになっているかどうかを判断することで、ロボットアームに対する制御が可能になる。そこで、本節では主にワイヤ干渉駆動の解析方法を紹介する。

- 行列から機構まで

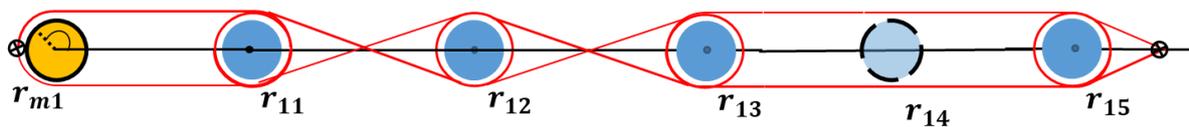


Fig. 2-10. Example of coupled tendon drive

(式 2.9) と (式 2.19) から、(式 2.21) がワイヤ駆動の結果を決定したことを理解することは難しくない。式では、ワイヤルーティング回数を表す  $S$  は、対応する関節プーリーとモーターの間のワイヤ交差回数を示し、図 2.10 に示すように、 $S = [(-1)^{s_{ij}}] = [(-1)^0, (-1)^1, (-1)^2, (-1)^2, (-1)^2]$ 。図 2.10 で、プーリー  $r_{14}$  の水色は、この位置にプーリーがないことを示し、ワイヤルーティング回数を計算するときには、この位置にプーリーがあると想定する必要がある。(式 2.21) では、関節プーリーを表す行列  $R$  は、 $R = [r_{11}, r_{12}, r_{13}, 0, r_{15}]$  と表示できる。0 は、この位置にプーリーがないことを意味する。 $R \odot R_m$  は、モータープーリーと関節プーリーの比率を意味する。

まず、必要に応じて干渉方程式を記述し、次に、上記の規則に従って、ワイヤ交差回数、関節プーリーの有無、およびモータープーリーと関節プーリーの比率を確定する。最後、構造を実現し、検証を行う。

- 機構から行列まで

機構が実現された後、この機構の干渉状況を知ることや、干渉の正確性を確認することが必要である。機構から干渉方程式を導く必要もある。

本節で紹介される方法によって、素早く機構のトルク方程式をまとめることができ、続けて研究するにも役立つ。また、この方法はワイヤ干渉駆動機構の開発を簡単にし、時間の節約もできる。さらに、直接機構の方程式が書き出すことができ、ロボットアームの制御が期待される。

本方法はモーターの正方向と関節の正方向の設定に重点を置く。プーリーと関節の回転方向の判断によって、例えば同方向は正で、反方向は負の場合、(式 2.21) のワイヤルーティング行列における正負の記号位置を素早く決定することができる。そして、プーリーの半径比率によって、(式 2.21) の中の数値も速く決められる。

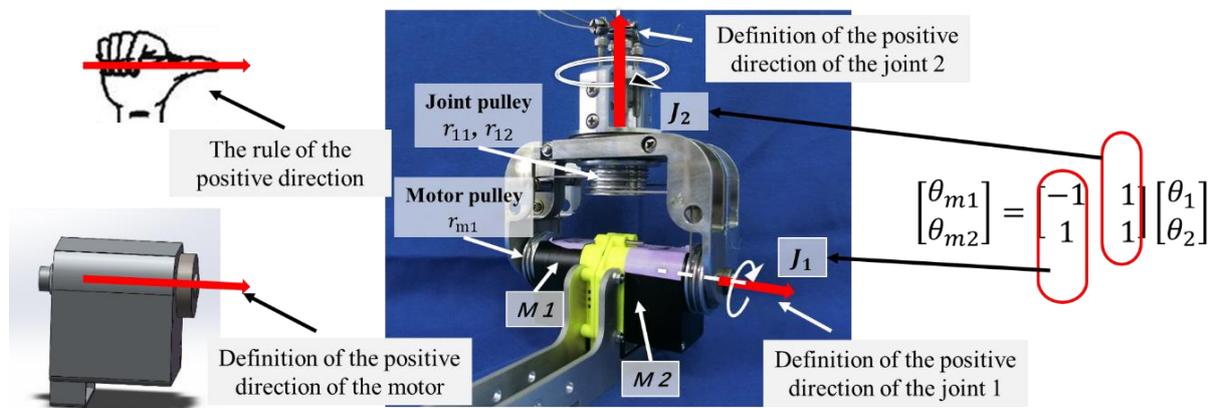


Fig. 2-11. The definition and rules of the positive direction

ここからは実験用の機構を作って、例を挙げながら本節の内容について説明する。まず、正方向を決める。右手の法則に従って、親指は回転軸に指し、四指の回転方向は正方向と定義する。図 (2-10) では、機構の正方向を簡単に見つけることができる、

そして、出力軸の方向は自由に決められる。しかし、モーターの場合は異なる。ここで、右手の親指がモーターの出力軸へ指すと決めれば、四指の回転方向はモーター回転子の正方向になるが、回転子が静止し、固定子が回転すれば、固定子も静止すると仮定する必要があり、回転子の方向を確認しなければならない。

図(2-10)では、関節 $J_2$ が決められた正方向に従って回転する場合、ワイヤの張力でモーターの回転方向を判断することができる。そのうえで、モーターの正方向と比較する。方向が同じである場合、トルク方程式の係数は正で、逆方向では、トルク方程式の係数は負になる。関節 $J_1$ が決められた正方向に従って回転する場合、ワイヤの張力でモーターの回転方向を判断するのは同じであるが、関節 $J_1$ の回転はモーターの固定子の回転だということを注意しなければならない。そのうえでモーターの回転方向を判断し、モーターで決められた正方向と比較する。

この方法によって、素早く機構のトルク方程式をまとめることができる。それと同時に、機構開発やロボット制御に良い検証方法も示している。

## 2.9 まとめ

この章では、既存の干渉駆動と本論文の干渉駆動の違いを紹介した。本論文の干渉駆動の説明、及び干渉駆動の定義を与えた。第 2.2 節は、モーターと関節角度の関係から、ワイヤ干渉駆動を解析した。第 2.3 節は、モーターと関節トルクの関係から、ワイヤ干渉駆動を解析した。第 2.4 節は、ワイヤ干渉駆動の一般性をまとめ、干渉駆動の有効性は開発した干渉駆動モジュールを通じて証明した。最後に、ワイヤ干渉駆動モデルを迅速に確立する方法を示した。

## 第3章 2モーター2自由度ワイヤ干涉駆動モジュール

---

3.1	はじめに.....	50
3.2	2モーター2自由度の干涉駆動.....	51
3.2.1	2モーター2自由度マニピュレータの例.....	51
3.2.2	2モーター2自由度マニピュレータのワイヤルーティング.....	52
3.3	2モーター2自由度干涉駆動モジュールの分類.....	58
3.4	2モーター外付け機構.....	60
3.4.1	ワイヤルーティングの説明.....	60
3.4.2	トルクと角度.....	61
3.4.3	機構の特徴.....	62
3.5	2モーター内蔵同軸機構.....	63
3.5.1	ワイヤルーティングの説明.....	63
3.5.2	トルクと角度.....	64
3.5.3	機構の特徴.....	65
3.6	1モーター外付け機構.....	67
3.6.1	ワイヤルーティングの説明.....	67
3.6.2	トルクと角度.....	68
3.6.3	機構の特徴.....	69
3.7	2モーター内蔵異軸機構.....	71
3.7.1	ワイヤルーティングの説明.....	71
3.7.2	トルクと角度.....	72
3.7.3	機構の特徴.....	73
3.8	4種類の機構特徴の対比.....	74
3.9	モーターの配置による精度の向上.....	76
3.10	まとめ.....	80

---

### 3.1 はじめに

2 モーター2 自由度ワイヤ干渉駆動は新しいものではなく、昔からロボットに応用されていた。しかし、これまでに干渉駆動が実用化された例は少ない。原因は主に以下の2点である。1. 現在、2 モーター干渉駆動のワイヤルーティング方法についてまとめた研究はない。ワイヤのルーティング方法は直接干渉駆動の結果に影響を与えるため、ワイヤの経路を考慮せずに機構を実現すると、期待していた結果を出せないことがある。2. 現在、モーター位置が干渉結果に与える影響に関する研究はない。干渉駆動では、モーター位置の違いが干渉モジュールのサイズに影響する。また、関節トルクを上げるために関節プーリーの半径比率の変更が必要になるとき、モーター位置も半径比率が変更された後の結果に影響する。したがって、本章は、主に2 モーター干渉駆動にあるワイヤのルーティング方法とモーター位置による干渉結果への影響についてまとめる。

第2章では、ワイヤ干渉駆動の一般形式について論じ、ワイヤルーティング行列  $S$  とプーリー比率行列  $R \odot R_m$  をまとめ、ワイヤ干渉駆動の定義についても説明した。ただし、定義を満たすワイヤ干渉駆動は、さまざまな形式がある。角度 (式 2.22) とトルク (式 2.24) から、干渉後の結果が異なることがわかる。最適な干渉方法を確定し、各種干渉方法の違いを比較するのは本章の重点である。3.2 節では、関節プーリーの有無やワイヤルーティングの方向によって、各種干渉の違いについて論じる。3.3 節では、モーター位置が干渉結果に対する影響について説明する。

### 3.2 2モーター2自由度の干渉駆動

#### 3.2.1 2モーター2自由度マニピュレータの例

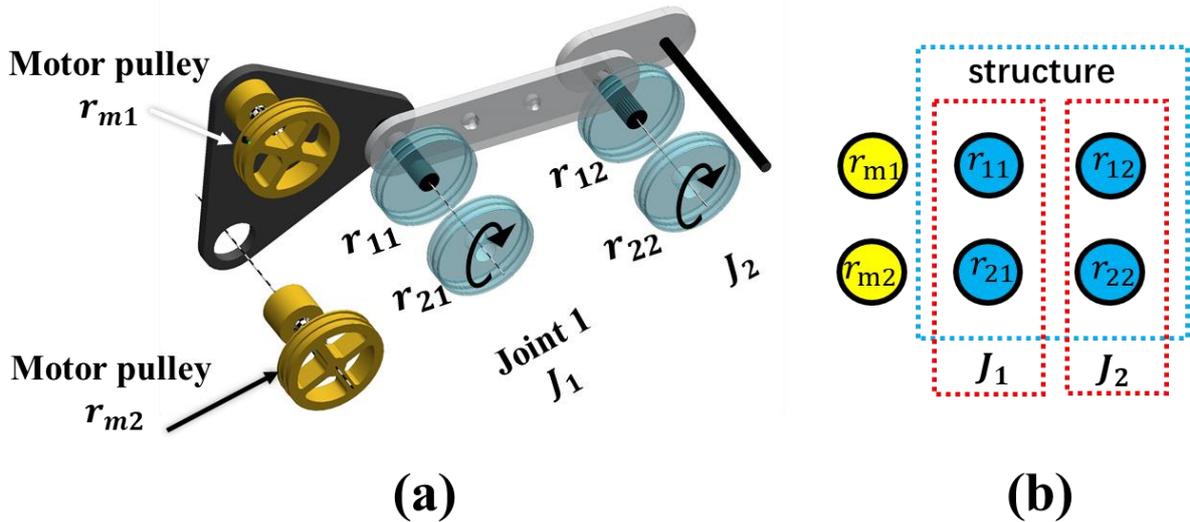


Fig. 3-1. Schematic diagram of the 2 motor 2 DoF manipulator

本論文の2モーター2自由度は、2つのモーターが共同に2つの関節を駆動することを意味する。図3-1(a)に示すように、2つのモータープーリーと各関節における関節プーリーが必要である。効率的に研究するため、図(a)を図(b)の様式で示し、図の中の関節プーリーとモータープーリーをそれぞれ対応させる。

次に、トルク結果に影響を与える可能性のあるワイヤルーティング行列を解析する。(式2.21)は、干渉結果を決定できるワイヤルーティング行列である。この行列には、ワイヤルーティング行列  $S$ 、関節プーリー位置行列  $R$ 、およびモータープーリーと関節プーリーの半径比率の行列  $R \odot R_m$  という3つの重要な要素がある。その中で、ワイヤルーティング行列  $S$  と関節プーリー位置行列  $R$  は、トルク分布を決定する重要な要素である。 $R \odot R_m$ はトルク比率の重要な要素である。

### 3.2.2 2 モーター2 自由度マニピュレータのワイヤーテーティング

まず、トルク分布を決定する2つの要因、ワイヤーテーティング行列  $S$  と関節プーリー位置行列  $R$  を解析する。ワイヤーテーティングの方向と関節プーリーの有無に応じて、すべて可能な方式を図 3-2 (b) (d) (e) のようにまとめ、考えられるすべての方法を3つの形式にまとめ、次にトルク比率を決定できる要因（モータープーリーと関節プーリー半径比率の行列  $R \odot R_m$ ）を考慮し、それを図 3-2 (c) のようにまとめる。図 3-2 (a) は、図 3-2 (b) の3次元図である。

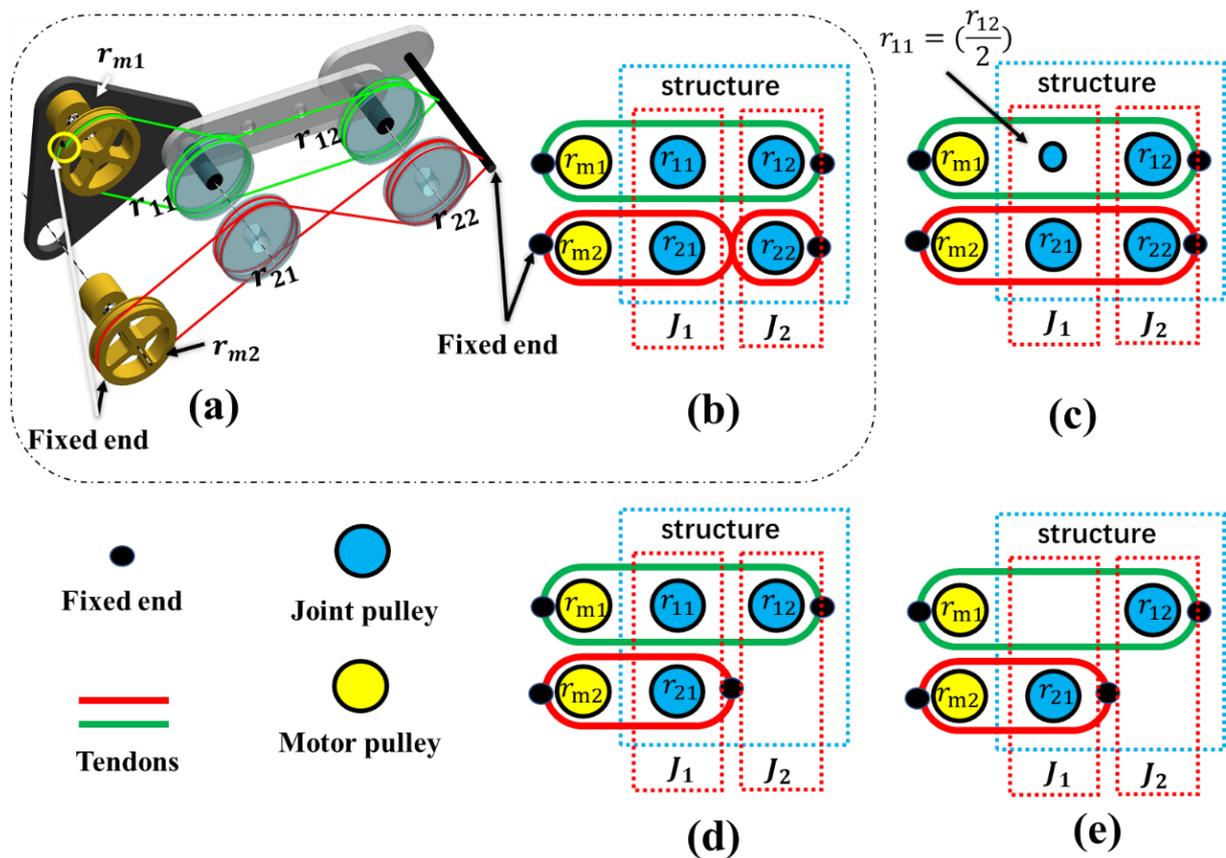


Fig. 3-2. Wire routing format with 2 DoF tendon driven

次に、この4つの形式について説明する。効率的に解説するため、図3-2(b)で(a)のワイヤルーティング方法を示す。

図3-2 (b) の機構では、2つのモータープーリー  $r_{m1}$  と  $r_{m2}$  があり、4つの関節プーリー ( $r_{11}$ ,  $r_{12}$ ,  $r_{21}$ ,  $r_{22}$ ) もある。ワイヤ端モータープーリーと末端関節のリンクに固定される。2本のワイヤはそれぞれモータープーリーから始まり、同じ回転方式で関節  $r_{11}$  と  $r_{21}$  にルーティングする。次に、反対の回転方式で関節  $r_{12}$  と  $r_{22}$  にルーティングする。ここで、4つの関節プーリーと2つのモータープーリーの半径は同じである。

(式2.21)によると、ワイヤルーティング行列  $A$  の計算方法から、図3-2 (b) のワイヤルーティング行列  $A_b$  が得られる。

$$A_b = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m1} \\ r_{21}/r_{m2} & -r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

図3-2 (c) の機構でも、2つのモータープーリーと4つの関節プーリーがある。図3-2 (b) との違いは、プーリー上のワイヤのルーティング方向にある。図3-2 (b) では、モーター2 のワイヤが関節プーリー  $r_{12}$  と  $r_{22}$  で異なる方向にルーティングしている。図3-2 (c) では、ワイヤのルーティング方向が同じで、モーター1 のワイヤのルーティング方向とも同じである。図3-2 (c) で、もしモータープーリーと関節プーリーの半径が同じで、得られるワイヤルーティング行列は逆行列のない行列であれば、この機構は制御されていない機構であると言える。ただし、モータープーリーと関節プーリーの半径比率行列  $R \odot R_m$  を考慮すると、この機構は制御可能な機構になる。図3-2 (c) に示すように、関節プーリーの半径  $r_{11}$  が他の関節プーリーの半径と等しくない場合 (表示させやすいため、ここでは関節プーリーの半径  $r_{11}$  は他のプーリーの半径の  $1/2$  になるときの状況を採用)、トルクの分布を計算する。

(式 2.21) のワイヤルーティング行列  $A$  の計算方法によれば, 図 3-2 (c) のワイヤルーティング行列  $A_c$  は次のようにまとめられる.

$$A_c = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m1} \\ r_{21}/r_{m2} & r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

図 3-2 (d) の機構では, 関節プーリーが 3 つしかなく, モーター 1 のワイヤのワイヤルーティング方式は (b) と (c) の機構のものと同じである. モーター 2 のワイヤルーティング方式が異なる. モーター 2 の 2 本のワイヤの一端はモータープーリー  $r_{m2}$  に固定され, 一端は関節 1 と関節 2 を接続するリンクに固定される. つまり, 関節 2 の回転は, モーター 2 とは関係がない.

ここで, (式 2.21) により, 図 3-2 (d) のワイヤルーティング行列  $A_d$  が得られる. 注意すべきなのは, もともと関節 2 のプーリー  $r_{22}$  が機構 (d) に表示されていないため, ワイヤルーティング行列における対応項目を 0 で置き換えることである.

$$A_d = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m1} \\ r_{21}/r_{m2} & r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

図 3-2 (e) に示された機構と (d) の機構では, ワイヤルーティング方式は同じだが, 関節プーリーが異なる. 図 3-2 (e) に示された機構では, 関節プーリーが 2 つしかなく, 機構 (d) と比べると, 関節  $r_{11}$  が足りない. これにより, 関節 1 が回転する時, モーター 1 の状態が関節 1 に影響を与えなくなる. (式 2.21) に従って, 図 3-2 (e) のワイヤルーティング行列  $A_e$  を次のように記述できる.

$$A_e = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m1} \\ r_{21}/r_{m2} & r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

図 3-2 の 4 つの形式を説明する行列  $A_b$ ,  $A_c$ ,  $A_d$ ,  $A_e$  が得られた後, モーターと関節の関係を解析する必要がある.

(式 2.22~2.25) により，モーターと関節の位置関係，およびモーターと関節の角度関係が判断できる。(式 2.26) と (式 2.27) により，関節が $\Delta\theta$  角度で回転する場合，または関節出力が $\Delta\tau_1$ の場合，各モーターの角度とトルクを表 3-1 にまとめる。

表 3-1 の各機構を順番に説明する。図 3-2 (b) 機構：関節 1 のみが回転する場合 ( $\Delta\theta_1=1, \Delta\theta_2=0$ )，モーター1 とモーター2 は同じ角度で回転し，2 つのモーターの回転角度は関節角度と同じである。関節 2 のみが回転する場合 ( $\Delta\theta_1=0, \Delta\theta_2=1$ )，モーター1 とモーター2 の回転角度の大きさは同じだが，回転方向が逆になる。モーター1 と関節の回転方向は同じで，大きさも同じである。モーター2 と関節の回転方向は逆だが，大きさは同じである。トルクに関しては，関節 1 のトルクが 1 (1 はモータートルク $\tau_m$ の倍数を表す) の場合，2 つのモーターのトルクはモーターの最大トルクの 1/2 倍になる。Max( $\tau_m$ )=1 であるため，関節 1 の最大トルクはモータートルクの 2 倍に達することができる。同様に，関節 2 のトルクが 1 の場合，2 つのモーターのトルクはモーターの最大トルクの 1/2 倍であり，関節 2 の最大トルクはモータートルクの 2 倍である。

Table 3-1. The relationship between motors and joints (Angle, Torque)

	A	Joint		Motor 1		Motor 2		Max $\tau_j$
		$\theta_j$	$\tau_j$	$\theta_{m1}$	$\tau_{m1}$	$\theta_{m2}$	$\tau_{m2}$	
☒ 3-2 (b) $A_b$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	$\Delta\theta_1$	$\Delta\tau_1$	1*	1/2*	1*	1/2*	2**
		$\Delta\theta_2$	$\Delta\tau_2$	1	1/2	-1	-1/2	2
☒ 3-2 (c) $A_c$	$\begin{bmatrix} 1/2 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\Delta\theta_1$	$\Delta\tau_1$	1/2	-2	1	2	1/2
		$\Delta\theta_2$	$\Delta\tau_2$	1	2	1	-1	1/2
☒ 3-2 (d) $A_d$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\Delta\theta_1$	$\Delta\tau_1$	1	0	1	1	1
		$\Delta\theta_2$	$\Delta\tau_2$	1	1	0	-1	1
☒ 3-2 (e) $A_e$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\Delta\theta_1$	$\Delta\tau_1$	0	0	1	1	1
		$\Delta\theta_2$	$\Delta\tau_2$	1	1	0	0	1

\* ratio to  $\Delta\theta_j$  or  $\Delta\tau_j$

\*\* ratio to motor torque

図 3-2 (c) の機構では、関節 1 のみが回転し ( $\Delta\theta_1=1$ ,  $\Delta\theta_2 = 0$ ), 関節 1 のトルクが 1 (1 はモータートルク  $\tau_m$  の倍数を意味し,  $\Delta\tau_1=1$ ,  $\Delta\tau_2 = 0$ ) の場合, モーター 1 の回転角度は関節角度の 1/2 だが, モーター 1 は 2 倍のモータートルクを提供する必要がある. モーター 2 の回転角度は関節角度と同じであり, 方向も同じである. モーター 2 も 2 倍のモータートルクを提供する必要があるが, モーター 1 で提供されるトルク方向とは反対になる. 関節 2 のバランスを維持するため, モーターは大きさが等しい, 方向が反対のトルクを提供する必要がある. 関節 2 のみが回転し ( $\Delta\theta_1=0$ ,  $\Delta\theta_2 = 1$ ), 関節 2 のトルクが 1 (1 はモータートルク  $\tau_m$  の倍数を表し,  $\Delta\tau_1=0$ ,  $\Delta\tau_2 = 1$ ) の場合, 2 つのモーターの角度は関節角度と同じである. モーター 1 は 2 倍のモータートルクを提供する必要がある, モーター 2 は 1 倍のモータートルクを提供する必要がある.  $\text{Max}(\tau_m)=1$  であるため, 干渉後, 2 つの関節の最大トルクはモータートルクの 1/2 になる.

図 3-2 (d) の機構を同じ方法で解析する. 関節 1 が回転し, トルクは 1 の場合, モーター 1 のトルクは 0 になるが, モーター 1 は回転する必要がある, 回転角度は関節とモーターの角度と同じでなければならない. モーターに対して, これはフォローアップ動作であり, トルクを提供しないが, アクティブに回転する必要がある. モーター 2 のトルクと角度は関節と同じである. 関節 2 が回転し, トルクが 1 の場合, モーター 1 の回転角度は関節と同じであり, トルクも関節と同じであることがわかる. モーター 2 は関節 2 と干渉していないため, 結果からみれば, モーター 2 は回転する必要がない. しかしながら, 関節 1 のバランスを維持するために, モーター 2 は反対方向のトルクを提供する必要がある. したがって,  $\text{Max}(\tau_m)=1$  の場合, 干渉後, 2 つの関節の最大トルクはモータートルクの 1 倍にすぎない.

図 3-2 (e) の機構について, 結果からみれば, 関節 1 と関節 2 が別々に制御される場合, 2 つのモーターの角度とトルクは互いに影響しない. これは, 実際にはモーターの直接駆動である. 2 つのモーターに干渉は生じていない.

表 3-1 によると, 図 3-2 (e) では, 2 つのモーターは干渉せず, モーターの直接駆動と同じである. 図 3-2 (d) で示された形式は, 現在最も広く使用されているワイヤ干渉駆動ロボットだが, 最優ではない. 図 3-2 (c) の形式は, 制御不能な機構によ

って、プーリー半径の比率を変化させることで実現された一種の干渉であり、理論的には実現可能だが、結果的には実用的ではない。図 3-2 (b) の形式は、唯一の干渉駆動の利点を持つワイヤルーティング方式である。半径比率を変えずに、関節トルクを上げることができるため、研究意義のある干渉駆動である。

### 3.3 2 モーター 2 自由度干渉駆動モジュールの分類

本節では、主に 2 モーター 2 自由度干渉駆動モジュールの分類方法について説明する。3.2 節では、ワイヤルーティングの違いと干渉結果への影響について説明した。その中の図 3-2 (c) の機構に注意すべきである。関節プーリーの半径がモータープーリーの半径と等しい場合、機構が制御不能になる。1 つのプーリーの半径比率を変えると、機構は制御可能になる。これによって、プーリーの半径比率を変えることで、機構が干渉しているかどうかのことに、または干渉後の結果に影響を与える可能性があると言える。しかし、モーターと関節が同軸の場合、モーターと関節プーリーの半径比率の変化は他の関節にのみ影響する。したがって、モーターの位置とプーリーの半径比率の両方が干渉の結果に影響する。本節は、3.2 で得られた最適な干渉方式図 3-2 (b) に基づいて、プーリーの半径比率の変化またはモーター位置の変化について解析する。

2 モーター 2 自由度干渉駆動モジュールには、1 つの干渉しかないということである。つまり、ワイヤが 1 つの関節に同方向でルーティングすると同時に、もう 1 つの関節に反対方向でルーティングする必要がある。これによって、2 モーター 2 自由度干渉駆動モジュールにおいても、ワイヤのルーティング方法が一つしかない。2 モーター 2 自由度干渉駆動を実現する時に、モーターは 2 つの配列方法がある。1 つはモータープーリーと関節プーリーが同軸で、モーターは機構と一緒に回転することである。もう一つは、モータープーリーと関節プーリーが異軸で、モーターは機構とともに動かないことである。各モーターは三つの可能な位置がある。2 つのモーターに選べる位置は 9 種類があり、総計 9 種の異なった機構がある。図 3-3 に示した行は同一の種類を表す。

モーターが異なる位置にあるいくつかの機構を作製した際に、それらの機構の出力方法が違うことに気づいた。特にプーリーの半径を変えた後、出力方法の違いがさらに明らかになった。したがって、モーター位置によって、それぞれ 2 モーター外付け機構 (図.3-3(1)), 2 モーター内蔵同軸機構 (図. 3-3(2), (3), (4), (5)), 1 モーター外付け機構 (図. 3-3(6), (7)), 2 モーター内蔵異軸機構 (図. 3-3(8), (9))と呼ぶ。ここで、この 4 つの機構について詳しく説明する。

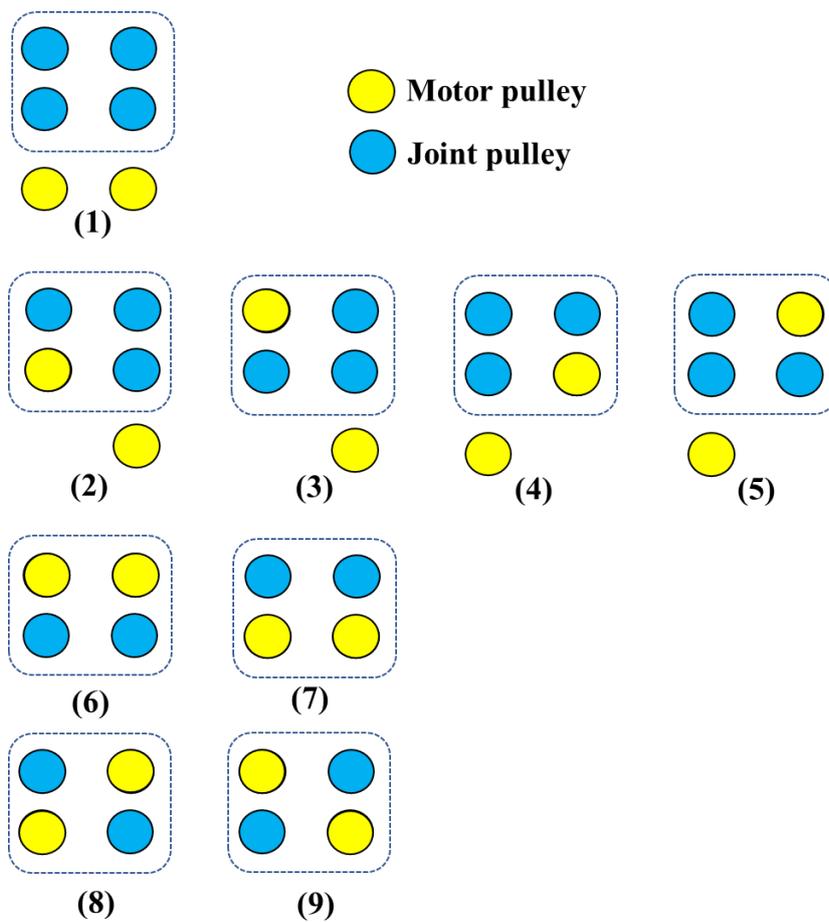


Fig. 3-3. Classification of mechanisms according to the position of the motor

### 3.4 2 モーター外付け機構

本節では、主にワイヤのルーティング方法、機構の説明、トルク関係式及び機構の特徴を中心に、2 モーター外付け機構を紹介する。

#### 3.4.1 ワイヤルーティングの説明

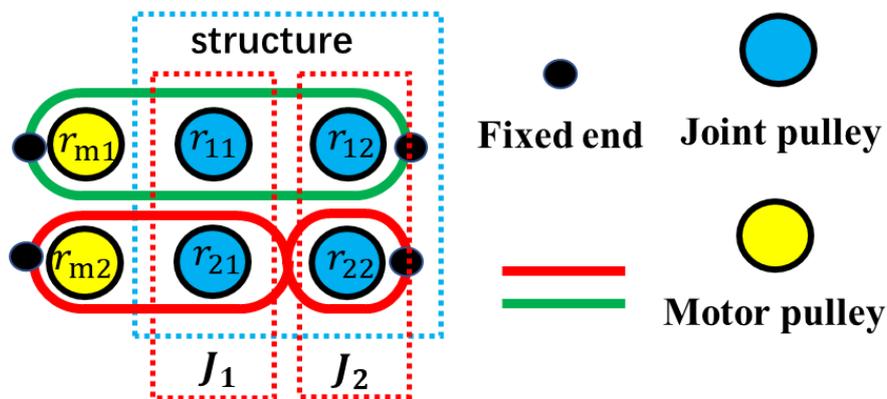


Fig. 3-4. Externally-Actuated Structure of Wire Routing

図 3-4 に示されたのは 2 モーター外付け機構のワイヤルーティング方法である。このルーティング方法 3.2.2 節で紹介した図 3-2 (b) の機構に似ている。黄色の円はモータープーリーを表し、モータープーリーの半径はそれぞれ  $r_{m1}$  と  $r_{m2}$  で、青い円は関節プーリーを表す。機構のシンプルさを考慮したうえで、関節プーリーのプーリー半径は  $r_{ij}$  で示す。また、 $J_1$  と  $J_2$  はそれぞれ 2 つの関節の回転を表し、赤いフレームは 2 つの関節プーリーが関節の回転軸と同じであることを示す。

そのなか、2 つのワイヤはモータープーリー  $r_{m1}$  に固定され、もう 2 つのワイヤはモータープーリー  $r_{m2}$  に固定される。そして、モーターが回転する際には、ワイヤはモータープーリーにルーティングするので、モーターはトルクをワイヤの長さ変化、すなわちワイヤの引っ張りを変える。4 つのワイヤを同じルーティング方向で関節  $J_2$  の関節プーリーにルーティングし、また逆のルーティング方向で  $J_1$  の関節プーリーにルーティングする。2 つのモータープーリー  $r_{m1}$  と  $r_{m2}$  は機構外部に独立すること、つまり

2つのモーターの回転軸は関節の回転軸と分かれているのは機構の特徴であるため、この機構を2モーター外付け機構と呼ぶ。

ワイヤのルーティング方法から見れば、2つのモーターが同方向で回転する時、関節 $J_1$ におけるワイヤのルーティング方向が反対であるため、関節 $J_1$ 中にワイヤのパワーバランスを維持する必要があるため、関節 $J_1$ は回転しない。その時、ワイヤの長さ変化は関節 $J_2$ の関節プーリーに示される。逆に、2つのモーターが反対方向で回転する時、関節 $J_2$ におけるワイヤのルーティング方向が同じであるため、関節 $J_2$ 中にワイヤのパワーバランスを維持する必要があるため、関節 $J_2$ も回転しない。その時、ワイヤの長さ変化は関節 $J_1$ の関節プーリーに示される。したがって、ワイヤのルーティング方法から、各関節プーリーは2倍のモータートルクになることが分かる。

### 3.4.2 トルクと角度

(式 2.21) により、ワイヤルーティング行列  $A$  の計算から、モーター外付け機構のワイヤルーティング行列  $A_1$  を得られた。

$$A_1 = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m1} \\ r_{21}/r_{m2} & -r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

トルク行列

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{21}/r_{m2} \\ r_{12}/r_{m1} & -r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

角度行列

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{22}r_{m1}/(r_{11}r_{22} + r_{12}r_{21}) & r_{12}r_{m2}/(r_{11}r_{22} + r_{12}r_{21}) \\ r_{21}r_{m1}/(r_{11}r_{22} + r_{12}r_{21}) & -r_{11}r_{m2}/(r_{11}r_{22} + r_{12}r_{21}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

(式 3.5-3.7) から，モータープーリーの半径に対する関節プーリーの半径の比率は各関節トルク出力に影響を与えることが分かる．

### 3.4.3 機構の特徴

本論文では，2 モーター外付け機構を作製した図 3-5. 図に示されたのは 2 つのモーターとモータープーリーの位置，関節 $J_1$ と $J_2$ の回転軸の位置及び関節プーリーの位置である．2 つのモーターが機構の外部にあるため，関節の回転部分のサイズを小さくさせ，2 つの関節 $J_1$ と $J_2$ の回転軸を同一平面上にすることができる．回転軸が同一平面上にあることはとても有意義である．例えば，人の手首の動きは 2 つの上下と左右曲げ動作で，同一平面上の動作である．他機構を使用すると，人の手首のような動きを完成しにくいと考えられる．

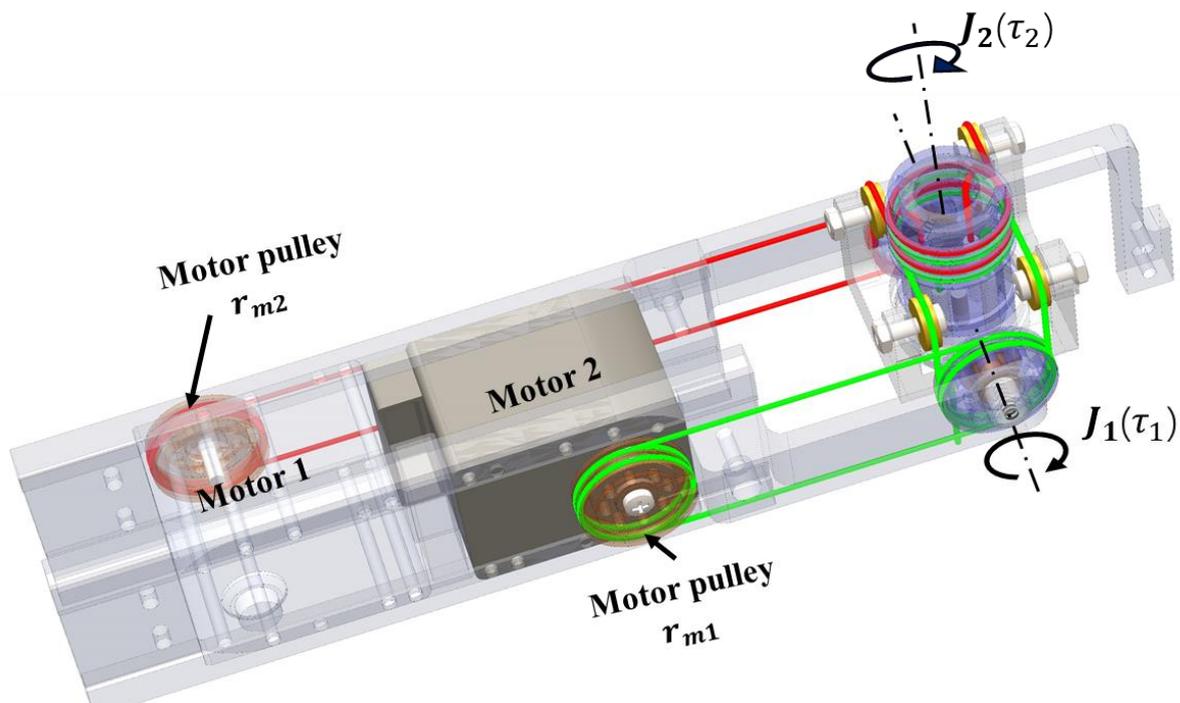


Fig. 3-5. Externally-Actuated Structure

### 3.5 2モーター内蔵同軸機構

本節では、主にワイヤのルーティング方法、機構の説明、トルク関係式及び機構の特徴を中心に、2モーター内蔵同軸機構を紹介する。

#### 3.5.1 ワイヤルーティングの説明

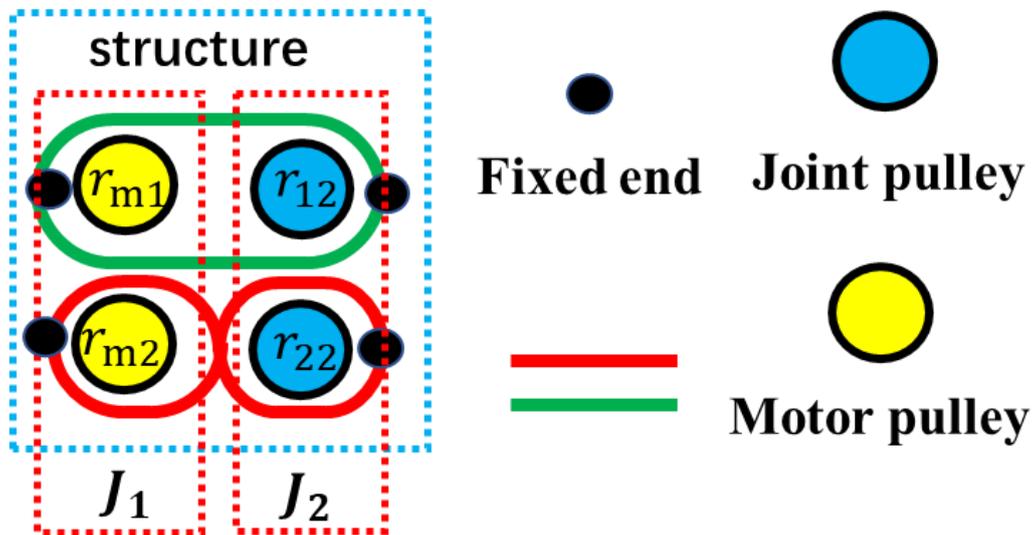


Fig. 3-6. Internally-Coaxially-Actuated Structure of Wire Routing

図3-6に示されたのは2モーター内蔵同軸機構のルーティング方法である。黄色の円はモーターを表し、モータープーリーの半径はそれぞれ $r_{m1}$ と $r_{m2}$ で、青い円は関節プーリーを表す。機構のシンプルさを考慮したうえ、関節プーリーのプーリー半径は $r_{ij}$ で示す。また、 $J_1$ と $J_2$ はそれぞれ2つの関節の回転を表し、赤いフレームは2つの関節プーリーが関節の回転軸と同じであることを示す。

2つのワイヤはモータープーリー $r_{m1}$ に固定され、もう2つのワイヤはモータープーリー $r_{m2}$ に固定される。2モーター外付け機構と異なったのは、2モーター内蔵同軸機構の2つのモーターの回転軸は、そのうちにある1つの関節の回転軸と同軸になることである（本機構では、モーター $r_{m1}$ と $r_{m2}$ の回転軸は関節 $J_1$ と同軸になる）。ワイヤ

は同じルーティング方向でモータープーリー  $r_{m1}$  と  $r_{m2}$  にルーティングし、反対方向で関節  $J_1$  の 2 つの関節プーリーにルーティングする。したがって、こういった機構を 2 モーター内蔵同軸機構と呼ぶ。

この機構では、モーターが関節と同軸であるため、関節  $J_2$  が回転し、 $J_1$  が回転しない時、2 つのモーターの回転子が回転する。モーターのトルクをワイヤの引張力に変え、関節  $J_2$  の関節プーリーに伝導する。つまり、モーターの回転子が回転する時、関節  $J_1$  が静止する。一方、関節  $J_2$  が回転しなく、 $J_1$  が回転する時、関節  $J_2$  中にワイヤのパワーバランスを維持するための、ワイヤの長さ変化はしない、つまり関節  $J_1$  は回転しない。そのため、2 つのモーターの回転子は静止する。上記の解析から、1 つの特別な動き方法を開発しなければならないと気付いた。モーターは一つの関節と共に回転する必要がある。つまり、モーターの回転子が回転する時に 1 つの自由度になり、固定子が回転する時にもう 1 つの自由度になる。したがって、本機構では、モーターが反対方向で回転すると、2 つのモーターは固定される。そして、関節  $J_1$  中にワイヤのパワーバランスを維持するため、モーターの回転子が回転すると、関節  $J_2$  も回転させる。モーターが同方向で回転する時、関節  $J_1$  中にワイヤのパワーバランスを維持する。そして、モーターの回転子が静止し、モーターの固定子が回転し、関節  $J_1$  を回転させる。

### 3.5.2 トルクと角度

(式 2.21) により、ワイヤルーティング行列  $A$  の計算から、2 モーター内蔵同軸機構のワイヤルーティング行列  $A_2$  を得られた。

$$A_2 = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m1} \\ r_{21}/r_{m2} & -r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

2 つのモーターが関節 1 と同軸であるが、関節 1 が回転する時、モーターの回転子が静止し、固定子が回転する。したがって、(式 3.8) では、関節プーリー  $r_{21}$  と  $r_{22}$  はモ

ータープーリーに換えられた。つまり， $r_{11}=r_{m1}$ ， $r_{21}=r_{m2}$ 。まとめられた（式 3.9）は 2 モーター内蔵同軸機構のトルク関係式である。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_{12}/r_{m1} \\ 1 & -r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{2m} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

角度行列

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{22}/(r_{22} + r_{21}) & r_{m2}/(r_{22} + r_{21}) \\ r_{21}/(r_{22} + r_{21}) & -r_{m2}/(r_{22} + r_{21}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{2m} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

（式 3-10）から分かったのは，2 モーター内蔵同軸機構では，モータープーリーの半径に対する関節プーリーの半径の比率は，関節 $J_2$ の出力トルクにしか影響を与えず，関節 $J_1$ の出力トルクは変わらないことである。

### 3.5.3 機構の特徴

本論文では，2 モーター内蔵同軸機構の作成を試みた図 3-7。図には 2 つのモーターとモータープーリーの位置，関節 $J_1$ と $J_2$ の回転軸の位置及び関節プーリーの位置を示した。この機構には，1つのメリットがある。それは，関節 $J_1$ が回転すると，モーターで直接駆動するに近いので，関節 $J_1$ の制御精度がより高くなる。もしモーターが角度フィードバックの機能も付いているなら，この機能で関節 $J_1$ の角度を反映することもできる。しかしこの機構はモーターのサイズに影響され，2 つのモーターを関節と同軸にする必要がある。機構が広められ，特別な要求のもとしか使われない。

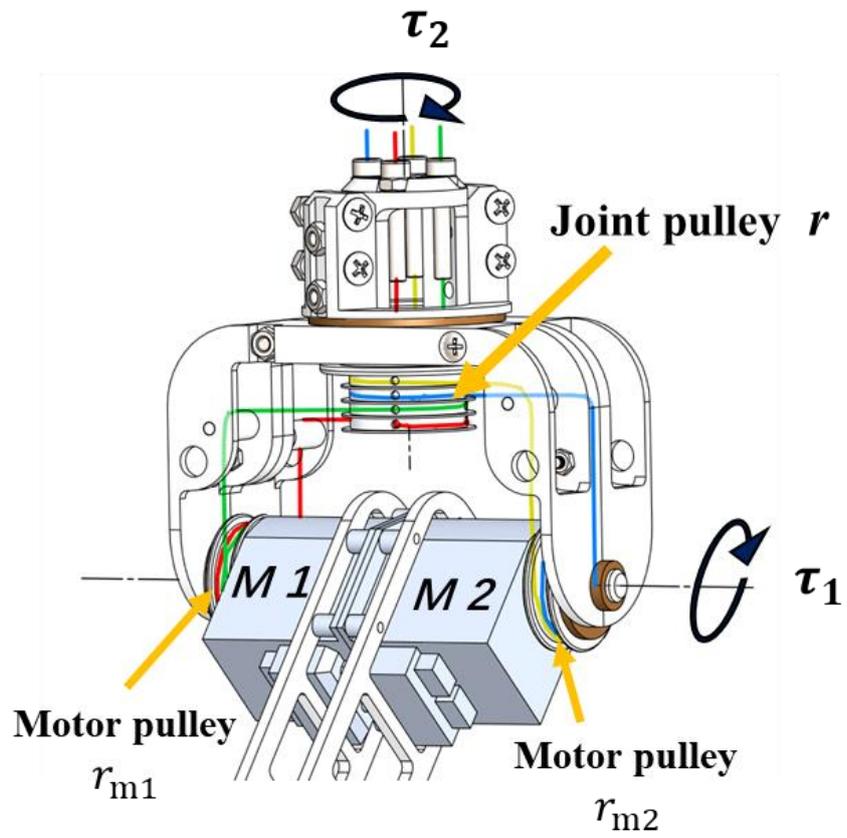


Fig. 3-7. Internally-Coaxially-Actuated Structure

### 3.6 1 モーター外付け機構

本節では、主にワイヤのルーティング方法、機構の説明、トルク関係式及び機構の特徴を中心に、1 モーター外付け機構を紹介する。

#### 3.6.1 ワイヤルーティンの説明

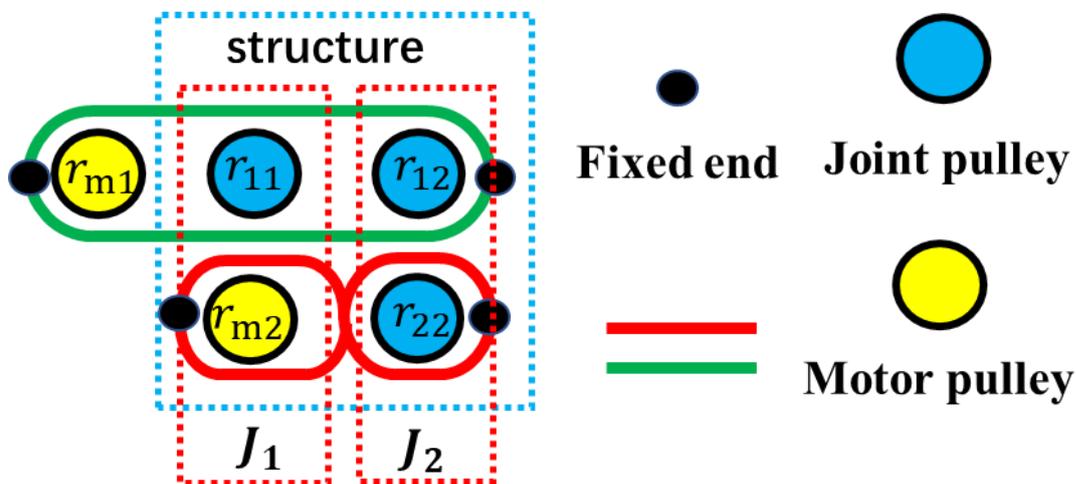


Fig. 3-8. Internally-Separately-Actuated Structure of Wire Routing

図 3-8 に示されたのは 1 モーター外付け機構のワイヤのルーティング方法である。黄色の円はモーターを表し、モータープーリーの半径はそれぞれ  $r_{m1}$  と  $r_{m2}$  で、青い円は関節プーリーを表す。機構のシンプルさを考慮したうえ、関節プーリーのプーリー半径は  $r_{ij}$  で示す。また、 $J_1$  と  $J_2$  はそれぞれ 2 つの関節の回転を表し、赤いフレームは 2 つの関節プーリーが関節の回転軸と同じであることを示す。

2 つのワイヤはモータープーリー  $r_{m1}$  に固定され、もう 2 つのワイヤはモータープーリー  $r_{m2}$  に固定される。2 モーター内蔵同軸機構と異なったのは、1 モーター外付け機構では、いずれの関節の回転軸と同軸になるモーターの回転軸は一つしかない（本機構では、モータープーリー  $r_{m2}$  と関節  $J_1$  が同軸で、モーター  $r_{m1}$  は機構の外部に置か

れる)。関節 $J_1$ では、ワイヤが同方向でそれぞれモータープーリー $r_{m1}$ と関節プーリーにルーティングする。そして、反対方向で関節 $J_2$ の関節プーリーにルーティングする。このような特徴から、この機構を1モーター外付け機構と名付ける。

この機構では、モーター2の回転方式は2モーター内蔵同軸機構内のモーターの回転方式と同じである、モーター2の回転子が回転する時、関節 $J_2$ の回転になり、モーター2の固定子が回転する時、関節 $J_1$ の回転になる。しかし、モーター2はモーター1と同方向で回転する時、関節 $J_1$ の回転になり、モーター1と反対方向で回転する時、関節 $J_2$ の回転にもなるが、モーター2の回転子だけ回転し、固定子は静止する。

ここまで、モーターが関節と同軸になる時、このモーターが機構と同時に回転することが想定できる。つまり、モーターの回転子は一つの自由度になり、固定子はもう1つの自由度になるということである。この仮定は、2モーター内蔵異軸機構の中で検証ができ、小型の3自由度干渉駆動モジュールの実現に良い根拠を提供すると考えられる。

### 3.6.2 トルクと角度

(式2.21)により、ワイヤルーティング行列 $A$ の計算から、2モーター内蔵異軸機構のワイヤルーティング行列 $A_3$ を得られた。

$$A_3 = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m1} \\ r_{21}/r_{m2} & -r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

モーター2と関節 $J_1$ が同軸で、モーター1と関節の回転軸が違うため、関節 $J_1$ が回転する時、モーター2の回転子が静止し、固定子が回転する。したがって、式3-11では、関節プーリー $r_{21}$ はモータープーリー $r_{m2}$ に換えられ、つまり、 $r_{21}=r_{m2}$ である。まとめられた式3.12は1モーター外付け機構のトルク関係式である。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m2} \\ 1 & -r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

角度行列

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{22}r_{m1}/(r_{11}r_{22} + r_{12}r_{m2}) & r_{12}r_{m2}/(r_{11}r_{22} + r_{12}r_{m2}) \\ r_{m1}r_{m2}/(r_{11}r_{22} + r_{12}r_{m2}) & -r_{11}r_{m2}/(r_{11}r_{22} + r_{12}r_{m2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

(式 3-13) から分かったのは、1 モーター外付け機構では、モータープーリー $r_{m2}$ の半径に対する関節プーリーの半径の比率は、関節 $J_2$ の出力トルクにしか影響を与えず、関節 $J_1$ の出力トルクは変わらないことである。

### 3.6.3 機構の特徴

本論文では、1 モーター外付け機構を製作した図 3-9. 図には 2 つのモーターとモータープーリーの位置、関節 $J_1$ と $J_2$ の回転軸の位置及び関節プーリーの位置を示した。2 モーター内蔵同軸機構と同様に、この機構において、関節 $J_1$ が回転する時、モーター2 で直接駆動するのに相当する。したがって、モーター角度の観察によって関節 $J_1$ の角度を判断することができると思う。しかし、モーター2 はワイヤでトルクを関節 $J_2$ まで伝導するので、問題も生じる。もしモーター2 が $10^\circ$ 回転すれば、関節 $J_1$ の角度も $10^\circ$ と反映されるが、モーター1 が $10^\circ$ 回転する場合、ワイヤの変形である程度の角度が吸収される。そうすれば、当該機構が重みを負担する時、モーター1 の出力トルクはやや大きくなる可能性がある。これに対して、今後モーター1 のプーリー半径を変えることによって、こういった問題を解決する。

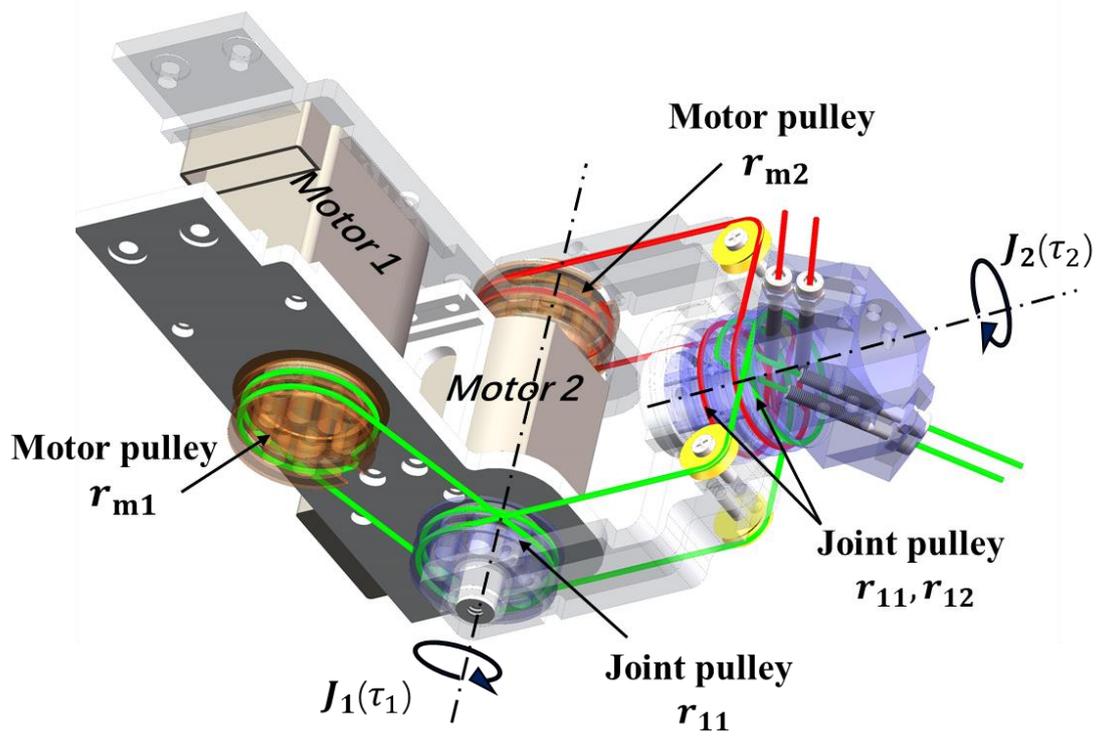


Fig. 3-9. Internally-Separately-Actuated Structure

### 3.7 2モーター内蔵異軸機構

本節では、主にワイヤのルーティング方法、機構の説明、トルク関係式及び機構の特徴を中心に、2モーター内蔵異軸機構を紹介する。

#### 3.7.1 ワイヤルーティングの説明

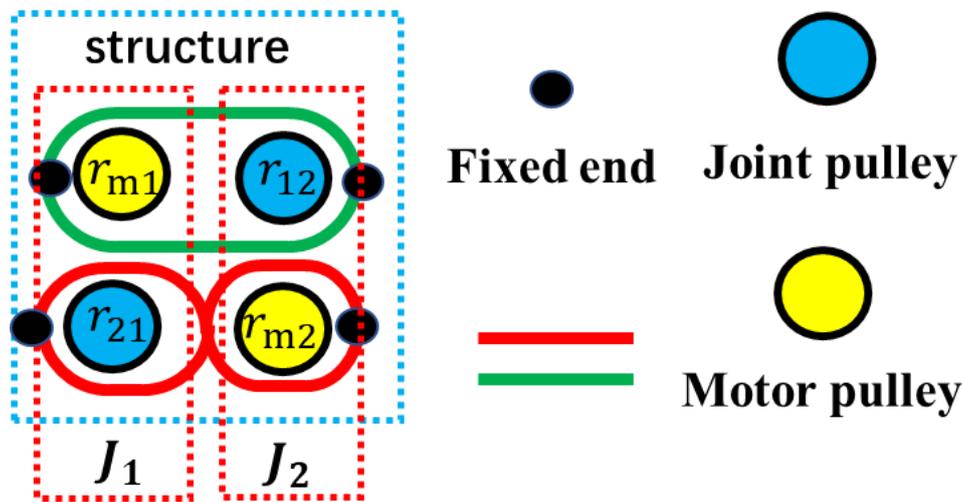


Fig. 3-10. Hybrid-Actuated Structure of Wire Routing

図 3-10 に示されたのは 2 モーター内蔵異軸機構のワイヤのルーティング方法である。黄色の円はモーターを表し、モータープーリーの半径はそれぞれ  $r_{m1}$  と  $r_{m2}$  で、青い円は関節プーリーを表す。機構のシンプルさを考慮したうえ、関節プーリーのプーリー半径は  $r_{ij}$  で示す。また、 $J_1$  と  $J_2$  はそれぞれ 2 つの関節の回転を表し、赤いフレームは 2 つの関節プーリーが関節の回転軸と同じであることを示す。

この機構では、2 つのモーターはそれぞれ異なる回転軸にあり、各モーターは関節の回転軸と同軸になる（本機構では、モーター1 と関節  $J_1$  の回転軸と同軸になり、モーター2 は関節  $J_2$  の回転軸と同軸になる）。そして、ワイヤのルーティング方法も同じで、関節  $J_2$  において、ワイヤが同じ方向で関節プーリーとモータープーリーにルーテ

イングし、関節 $J_1$ では、反対方向で関節プーリーとモータープーリーにルーティングする。したがって、この機構を2モーター内蔵異軸機構と呼ぶ。

2モーター内蔵異軸機構を解析する際、2モーター内蔵同軸機構と1モーター外付け機構の解析方法を参照する必要がある。モーターが関節回転軸と同軸になる時、必ずモーターの固定子が回転して1つの自由度になり、回転子の回転がもう1の自由度になる。本機構では、関節 $J_1$ が回転する時、モーター1の回転子が静止し、固定子が回転するが、モーター2のワイヤが反対方向でモーター1の固定子にルーティングしているため、モーター2の固定子が静止し、回転子が回転する。この関節 $J_1$ の動きの過程で、関節 $J_2$ のも同じである。

ここまで、一つの機構開発のコツがまとめられる。モーターが関節と同軸になる場合、このモーターは機構の回転とともに回転する。つまり、モーターの回転子は一つの自由度で、固定子がもう一つの自由度になる。

### 3.7.2 トルクと角度

(式2.21)により、ワイヤルーティング行列 $A$ の計算から、2モーター内蔵異軸機構のワイヤルーティング行列 $A_4$ を得られた。

$$A_4 = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m1} \\ r_{21}/r_{m2} & -r_{22}/r_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

モーター1と関節 $J_1$ が同軸で、モーター2と関節 $J_1$ が同軸であるため、(式3.6)では、関節プーリー $r_{11}$ と $r_{22}$ はモータープーリーに換えられ、つまり、 $r_{11}=r_{m1}$ 、 $r_{22}=r_{m2}$ 。まとめられた式3.12は2モーター内蔵異軸機構のトルク関係式である。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_{12}/r_{m2} \\ r_{21}/r_{m2} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

角度行列

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{m1}r_{m2}/(r_{12}r_{21} + r_{m1}r_{m2}) & r_{12}r_{m2}/(r_{12}r_{21} + r_{m1}r_{m2}) \\ r_{21}r_{m2}/(r_{12}r_{21} + r_{m1}r_{m2}) & -r_{m1}r_{m2}/(r_{12}r_{21} + r_{m1}r_{m2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

(式 3.16) から分かったのは、2 モーター内蔵異軸機構ではモータープーリー半径  $r_{m1}$  の変化は関節  $J_1$  の出力トルクに影響を与えず、また関節プーリー  $r_{m2}$  の変化も、関節  $J_2$  の出力トルクに影響を与えないことである。モーターの回転軸と同様の関節を、モーターに直接駆動される関節であると見ることができる。

### 3.7.3 機構の特徴

本論文では、2 モーター内蔵異軸機構が実現できず、原理図 3-11 のみを示す。2 モーター内蔵異軸機構は優れた機構で、モーターの角度によって直接に各関節の角度が確定でき、他の追加センサーも必要がないため、制御精度もより高くなる。しかしこの 2 モーター内蔵異軸機構が実現できなかった理由を 3.8 節で説明する。

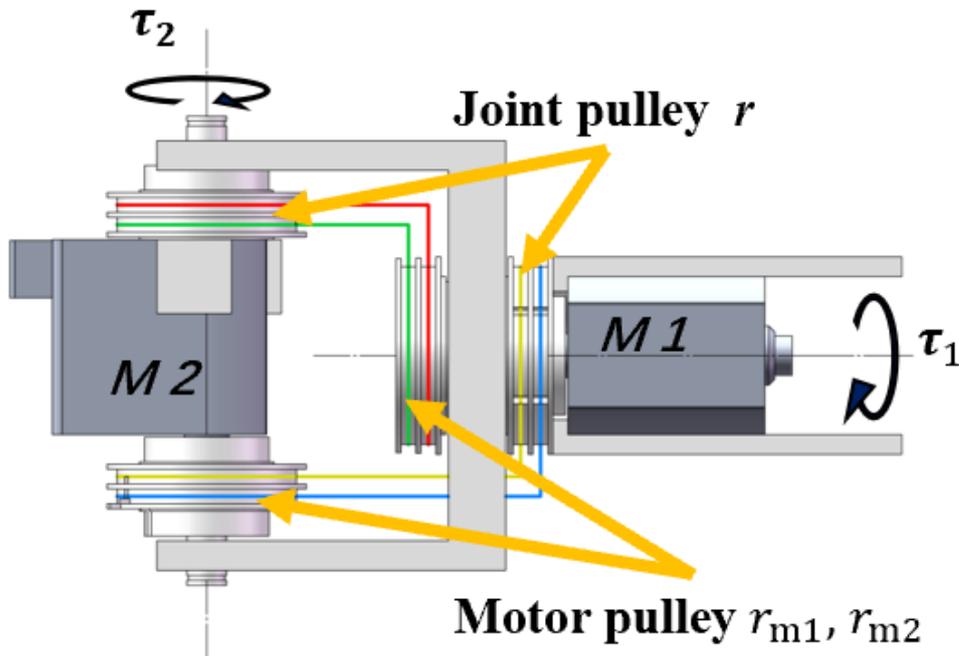


Fig. 3-11. Hybrid-Actuated Structure

## 3.8 4種類の機構特徴の対比

Table 3-2. Compare

機構	$r/r_{mk} = 1$		
	$A$	Max $\tau_1$	Max $\tau_2$
2 モーター外付け機構	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	2	2
2 モーター内蔵同軸機構	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	2	2
1 モーター外付け機構	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	2	2
2 モーター内蔵異軸機構	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	2	2
機構	$r/r_{mk} = 2$		
	$A$	Max $\tau_1$	Max $\tau_2$
2 モーター外付け機構	$\begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 2 & -2 \end{bmatrix}$	4	4
2 モーター内蔵同軸機構	$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}$	2	4
1 モーター外付け機構	$\begin{bmatrix} 2 & 2 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}$	3	3
2 モーター内蔵異軸機構	$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & -1 \end{bmatrix}$	2.5	2.5

ワイヤルーティング行列から、モータープーリーと関節プーリーの半径比率が1になる時、すべての機構の関節出力トルクは2倍のモーターのトルクになることが分かる。そうすれば、機構に対する更なる認識ができなくなると考える。将来、関節モジュールをより軽くしたいなら、もっと小さいモーターの使用が必要になる。しかしながら、その場合は小型モーターの出力トルクも小さくなる。ここで、関節モジュールにより大きな出力トルクをさせるため、本論文の2モーター2自由度干涉駆動モジュ

ールを採用するほか、モータープーリーと関節プーリーの半径比率を変えることでも実現できる。したがって、本節では、異なる領域と用途において、適切な2モーター2自由度干涉駆動モジュールを選ぶため、半径比率を変えることでこの四つの機構の特性を明らかにする。

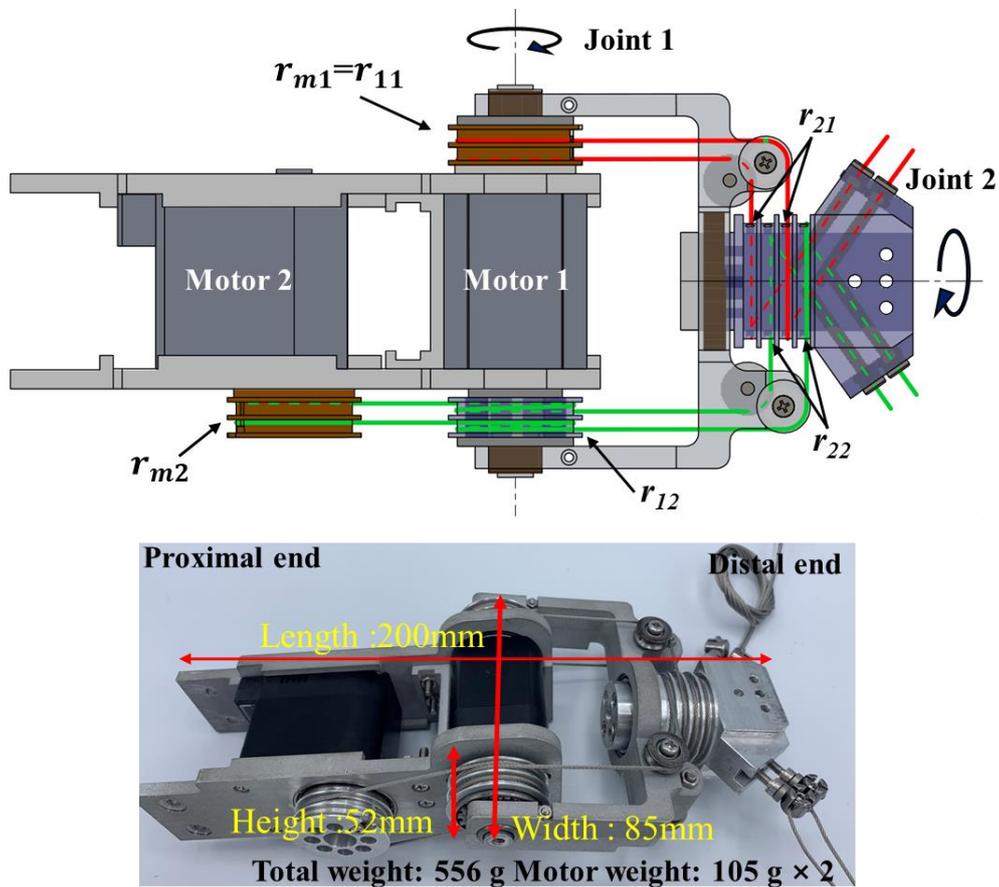
ここで、 $\text{Max}(\tau_{m1}, \tau_{m2})=1$  は、モーターのトルク $\tau_{mk}$ の制限条件である。2モーター2自由度干涉駆動モジュールと1自由度と比較性を持たせるため、計算する際には、2モーター2自由度干涉駆動モジュールにおける2つの自由度の一つを静止状態にさせ、もう一つの自由度の出力トルクを観察する。表3-2は、2モーター2自由度干涉駆動モジュールにおけるモータープーリーと関節プーリーの半径比率が1と2になる時の比較を示している。

比較の結果からみれば、関節プーリーとモータープーリーの半径比率を変える場合、異なる機構の出力トルクも違う。これは、今後の機構の選択においても参照ができる。このうち、関節プーリーとモータープーリーの半径比率が2になる時、2モーター内蔵異軸機構の増益がもっとも低いため、本論文では、この機構の実現ができなかった。

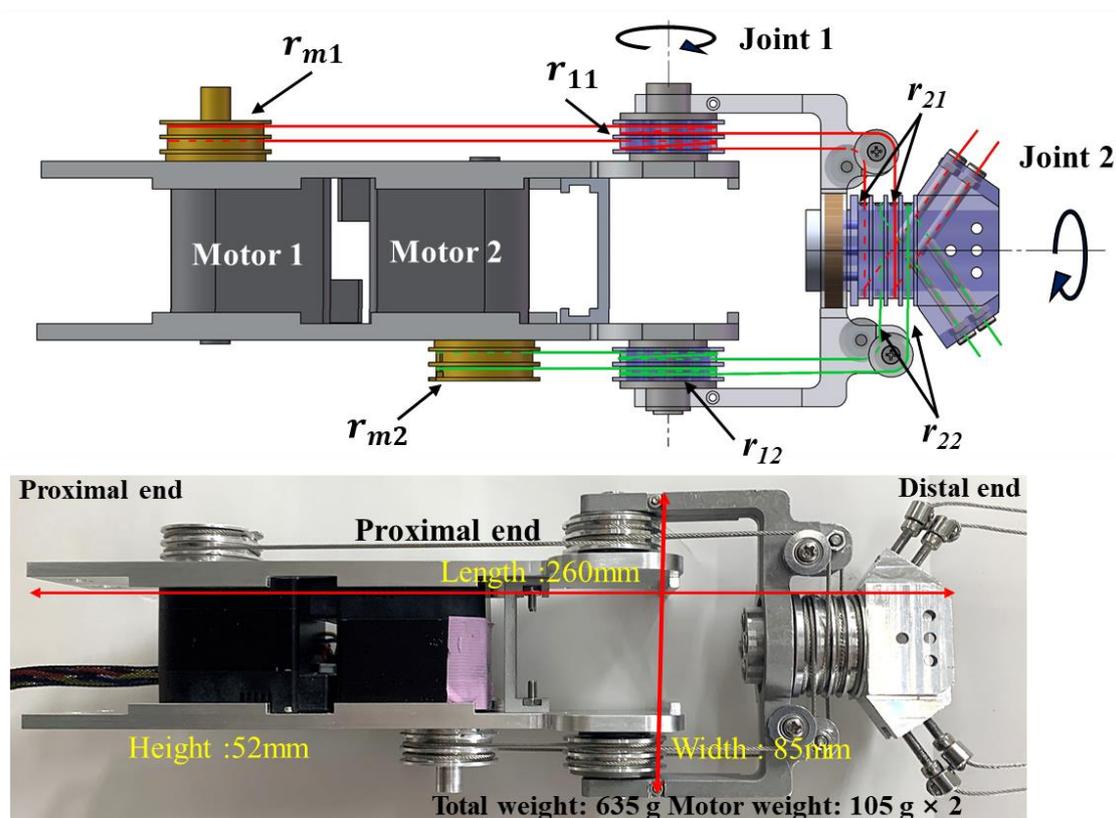
### 3.9 モーターの配置による精度の向上

3.8 節から、モーターの位置を変更することは、関節モジュールのサイズだけでなく、関節プーリーの半径比率が変更された後の干渉結果にも影響することがわかる。ワイヤ干渉機構では、モーターの位置を変えると、モーターと関節の間のワイヤの長さも変わる。ワイヤは弾性変形があるため、モーターの位置は関節の精度にも関係がある。

本節は、実験例を通じて、モーターの位置と精度の関係を示す。



(a)



(b)

Fig 3-12. Position experiment of different wire lengths  
 (a) Structure with shorter wire (b) Structure with longer wire

本論文は、2つの機構図 5-2 を開発し、二つとも 2 モーター2 自由度のワイヤ干渉駆動モジュールである。唯一の違いは、モーター1 の位置である。図 5-2 (a) では、モーター1 と関節 1 が同軸であるため、モーター1 のプーリーと関節 2 のプーリーの間の距離が短く、ワイヤの長さも短い。モーター1 のワイヤの長さはそれぞれ 187cm と 173cm である。図 5-2 (b) では、モーター1 の位置が変更され、モーター1 のプーリーから関節までの距離が長くなり、ワイヤの長さも長くなった。モーター1 のワイヤの長さはそれぞれ 391mm と 377mm である。(a) の機構に比べ、モーター1 のワイヤの長さは約 240mm 長くなった。

モーター1の位置を変更しただけで、モーター1と繋がるワイヤの長さを伸ばさせた。2つの機構を同じ条件下で実験し、ワイヤの長さとの精度の関係を検証する。図5-3は位置精度の実験である。関節2に同じアルミパイプを2本固定し、同じ位置に負荷をかけ、負荷重量はそれぞれ0g, 300g, 700gとする。関節1の回転を個別に制御し、2つのアルミパイプの負荷を0°から90°に増やす。磁気三次元位置測定装置(Liberty, Polhemus, USA)を使用して負荷の位置を測定する。図5-3に、2つのセンサーの位置と原点が示されている。

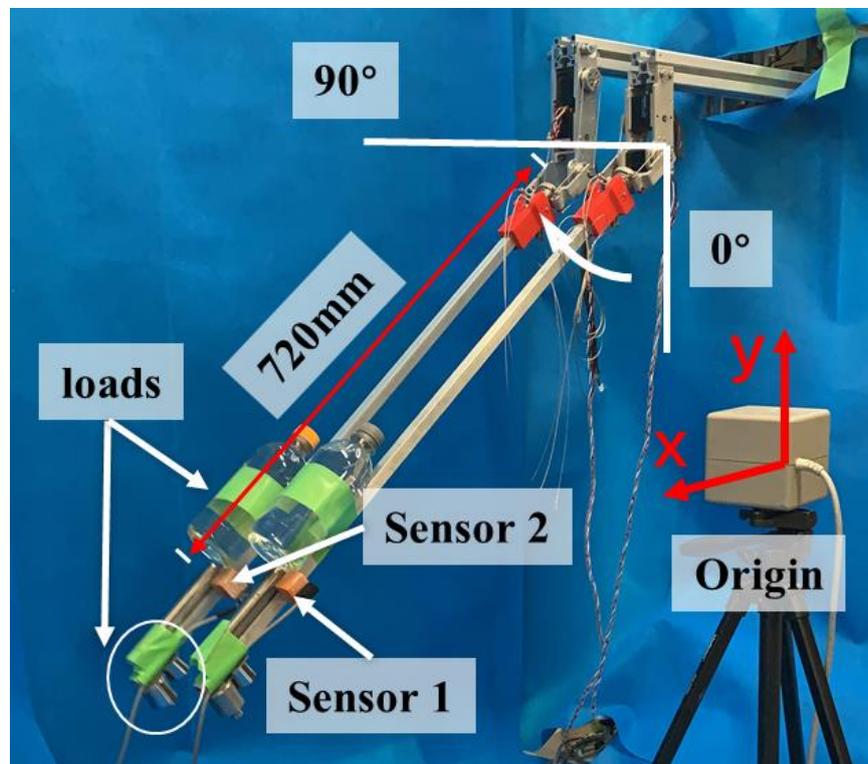


Fig 3-13. Position accuracy experiment.

図5-4の実験結果は、二種のタイプの位置精度が負荷の増加とともに低下することを示している。これは、ワイヤ駆動の一つの特徴である。しかし、(a)タイプの精度は(b)タイプより明らかに高く、荷重が0g, 300g, 700gの場合、(a)タイプの関節角度誤差はそれぞれ3.4°, 4.6°, 7.0°で、(b)タイプの精度は、それぞれ3.8°, 5.6°, 9.0°である。この二種のタイプを比較すると、誤差を生じる唯一の要因はワイヤの長

さであることがわかる。ワイヤが長ければ長いほど、位置の誤差が大きくなる。従って、モーターの位置は干渉結果だけでなく、干渉モジュールの精度にも影響を及ぼす。

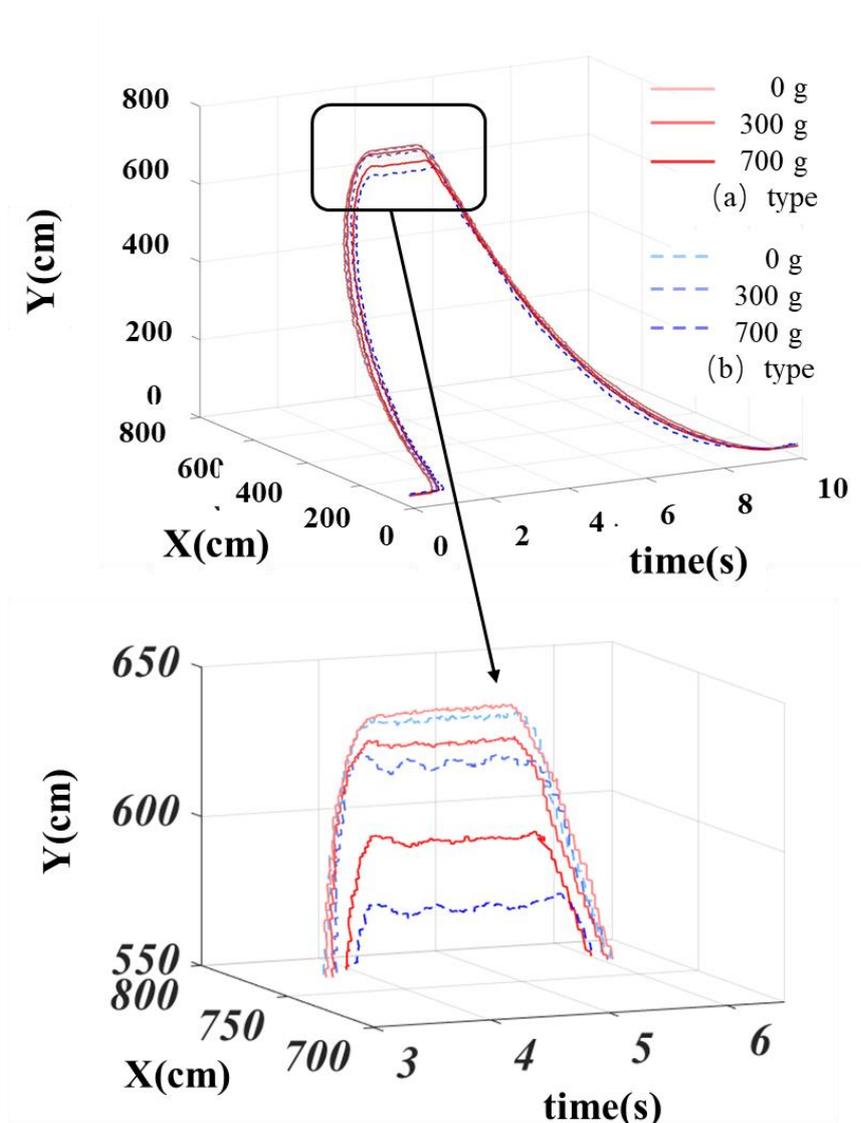


Fig 3-14. Experimental results of position accuracy. The position change near  $90^\circ$  was enlarged on the below side.

### 3.10 まとめ

本章は次の2つの問題を解決した。1.ワイヤのルーティング方法が干渉駆動結果に与える影響をまとめた。そして、4種のルーティング方法に対して、比較とまとめをし、干渉駆動で最も優れたワイヤのルーティング方法を得られた。2. モーターの位置が機構のサイズ、精度と関節トルクに対して与える影響をまとめた。また、ワイヤのルーティング方法、機構の説明、トルク関係式及び機構の特徴を中心に、各機構について紹介し、2 モーター2 自由度干渉駆動の実用化問題を解決した。本研究で実現した干渉駆動方法は、今後のワイヤ干渉駆動の選択、開発と設計の参考になると考えている。

最後、1つの機構開発のコツもまとめられた。モーターが関節と同軸になる場合、このモーターは機構の回転とともに回転する。つまり、モーターの回転子は1つの自由度で、固定子がもう1つの自由度になる。この結果によって、自由に干渉駆動モジュールの開発ができ、次の3 モーター3 自由度関節モジュールの小型化の根拠を示した。

## 第4章 3 モーター3 自由度ワイヤ干渉駆動モジュール

---

4.1 はじめに.....	82
4.2 3 モーター3 自由度の干渉駆動.....	83
4.3 3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールの分類.....	85
4.4 FULLY-ROUTED MOTOR-JOINT 形式.....	87
4.4.1 ワイヤルーティングの説明.....	87
4.5 1-UNROUTED MOTOR-JOINT 形式.....	92
4.5.1 ワイヤルーティングの説明.....	92
4.5.2 トルク解析.....	93
4.5.3 角度解析.....	95
4.6 2-UNROUTED MOTOR-JOINT 形式.....	97
4.6.1 ワイヤルーティングの説明.....	97
4.6.2 トルク解析.....	98
4.6.3 角度解析.....	100
4.7 3-UNROUTED MOTOR-JOINT 形式.....	102
4.7.1 ワイヤルーティングの説明.....	102
4.7.2 トルク解析.....	103
4.7.3 角度解析.....	105
4.8 4 種類の機構解析の対比.....	107
4.9 まとめ.....	111

---

## 4.1 はじめに

自由度の増加に伴い、モーターと関節との間のワイヤの経路は複雑になる。また、モーターの増加で、干渉の種類も増やされ、ワイヤ干渉駆動の開発が妨げられる。現在、ほとんど2モーター干渉でいくつかの簡単な関節モジュールを実現しているか、偶数のモーター干渉（6モーター、8モーターなど）を使用し、ロボットアームの開発を実現している。2モーター干渉を使用する機構は、ワイヤの経路やモーター位置を考慮しておらず、実現された機構は想定した効果を得ることが困難である。すでに開発されたマルチモーター干渉では、モーターの数が関節の数より多いため、モーターから関節までのワイヤの経路が複雑になる。これによりワイヤの数と長さが増加し、機構の精度、メンテナンス性と制御性も低下する。

人体の関節のほとんどは2自由度と3自由度の関節で構成されている。2自由度の干渉関節は広く研究されているが、人間の3自由度の関節を模倣できる干渉駆動は存在しない。3モーターの干渉は、ワイヤのルーティング方法によって異なる干渉結果が得られるため、本節は主に3モーター干渉の原理に焦点を当て、実現可能なすべての機構を分類する。

### 4.2.3 モーター3 自由度の干渉駆動

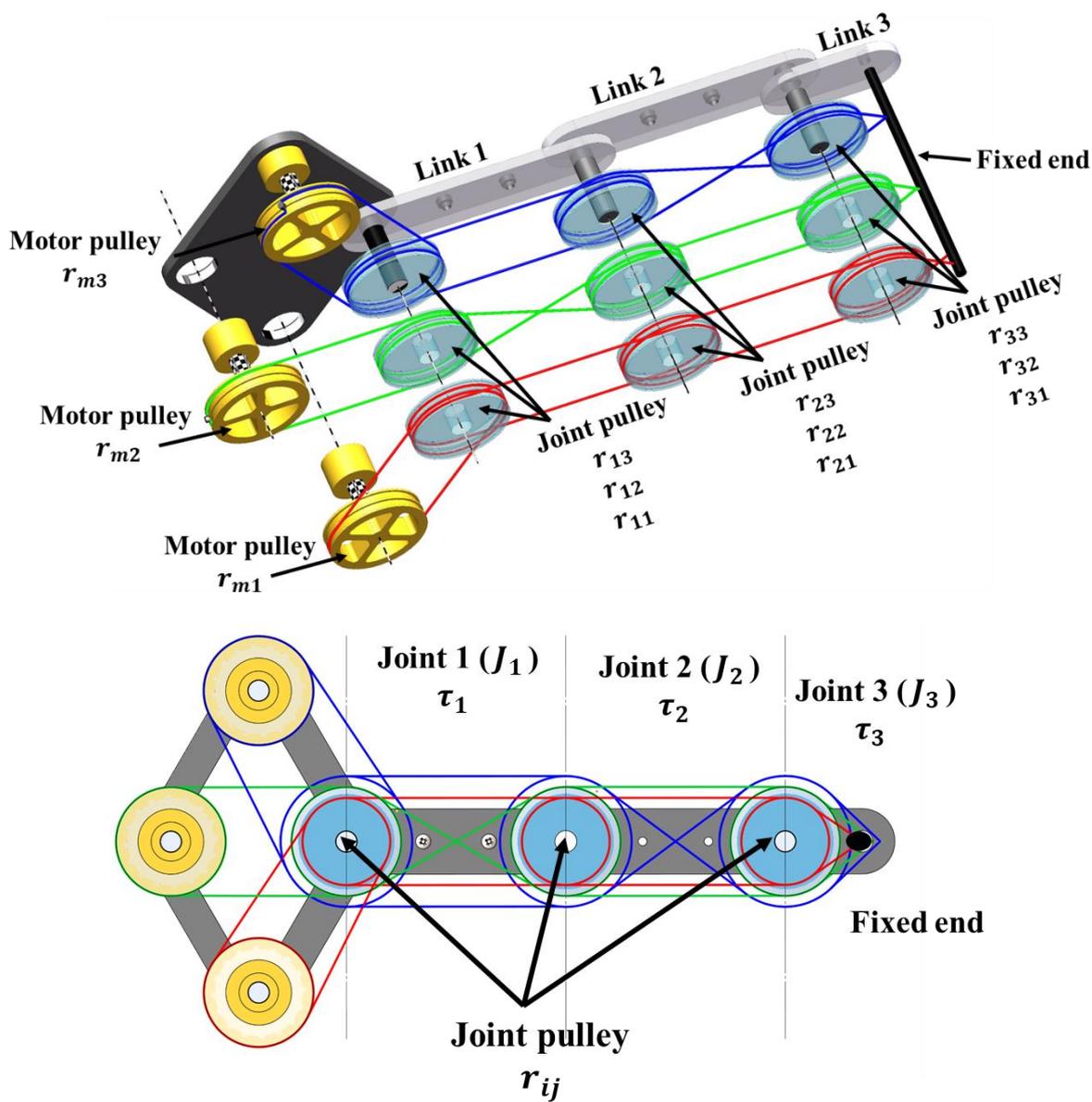


Fig. 4-1. Three-DoF planar manipulator as an example of 3M3D joint modules. (a) 3D model. (b) Planar schematic representation. For clarity, the motor-joint separate coupling structure is adopted. The example belongs to the after-mentioned fully-routed motor-joint form.

図 4-1 は, 3 モーター3 自由度ワイヤ干渉駆動の一般的な形式の 3D および平面図を示している. 3 モーター3 自由度ワイヤ干渉駆動とは, 3 つのモーターが 3 つの関節を駆動することを意味する. 各モーターのワイヤが, すべての関節の関節プーリーにルーティングし, 遠端の固定点に固定される. その中で, モーター2 のワイヤは関節 1 と関節 2 の間を 1 回交差し, モーター3 のワイヤは関節 2 と関節 3 の間を 1 回交差する. ワイヤの交差により, トルクの方向が変化され, 3 つのモーターが任意の関節で, 互いにトルクを打ち消すか, 協働で回転する. 3 モーター3 自由度ワイヤ干渉駆動におけるモータープーリーと関節プーリーの個数は, 2 モーター2 自由度ワイヤ干渉駆動より多いため, 各関節トルクの構成も多種の方法がある. したがって, 3 モーター3 自由度ワイヤ干渉駆動の特徴に応ずる分類方法が必要である.

### 4.3.3 モーター3自由度干渉駆動モジュールの分類

第3章の解析から、2モーター2自由度干渉駆動モジュールのルーティング方法は1通りしかないと分かる。つまり、2つのモーターが同方向で回転する場合、1つの自由度になり、逆に反対方向で回転する場合、もう1つの自由度になるということである。3モーター3自由度干渉駆動モジュールと2モーター2自由度干渉駆動モジュールは共に干渉駆動だが、3モーター3自由度干渉駆動モジュールのモーター数は奇数であるため、干渉駆動方式は唯一ではない。つまり、3モーター3自由度干渉駆動モジュールのルーティング方法はただ1つに限らず、各ルーティング方法には独自の特徴がある。

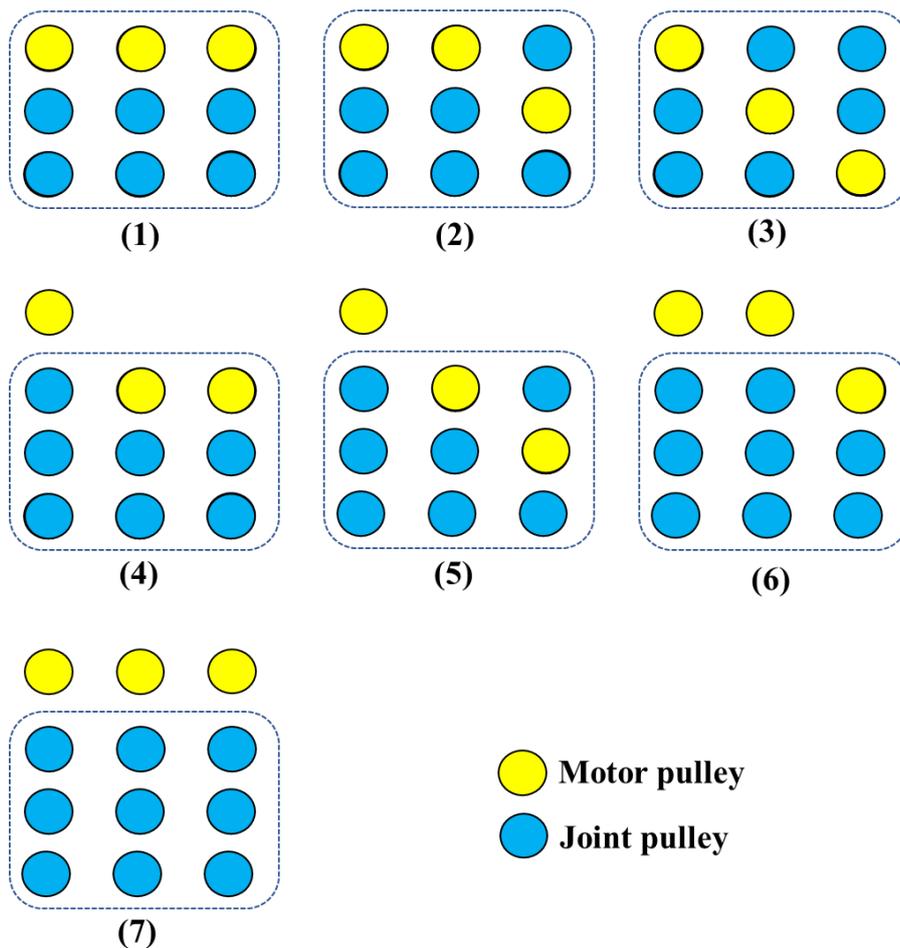


Fig. 4-2. Classification according to the position of the motor

3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールの各モーターには、1 つはモータープーリーと関節プーリーが同軸、つまりモーターが機構と一緒に回転するものと、もう1つ、モータープーリーと関節プーリーが異軸、つまりモーターは機構とともに動かないものがある。従って、3 つのモーターには  $4*4*4=64$  種のそれぞれ異なる配置方法がある 図 4-2.

第 2 章と第 3 章の解析によると、関節プーリーの位置変更や省略、またはワイヤのルーティング方向の変更など、すべてが干渉の結果に影響する。2 モーター2 自由度ワイヤ干渉駆動では、関節プーリー数が少ないため、関節プーリーの位置変更や省略、ワイヤのルーティング方向の変更があっても、干渉結果に影響を与えない。しかし、3 モーター3 自由度干渉駆動におけば、影響を受けてしまうため、新たな干渉機構になる。したがって、3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールの場合はワイヤのルーティング方法で分類をすることとする。それぞれ fully routed motor-joint 形式, 1-unrouted motor-joint 形式, 2-unrouted motor-joint 形式, and 3-unrouted motor-joint 形式と呼ぶ。モーターの機構内部に置かれた結果についての解析は、第 4 章の結論を参照されたい。

## 4. 4 Fully-Routed Motor-Joint 形式

Fully-Routed Motor-Joint 形式では、必ず9つの関節プーリーが必要で、またトルク行列には必ず逆行列が存在する。上記2つの条件を満たす機構を Fully-Routed Motor-Joint 形式と呼ぶ。

本節では、Fully-Routed Motor-Joint 形式のルーティング方法を紹介する。ルーティング方法でトルク関係式を導き、トルク方程式によって各モーターと各関節の回転時における出力状況、及びモーターの回転角度と各関節の回転角度の関係を確認する。

### 4. 4. 1 ワイヤルーティングの説明

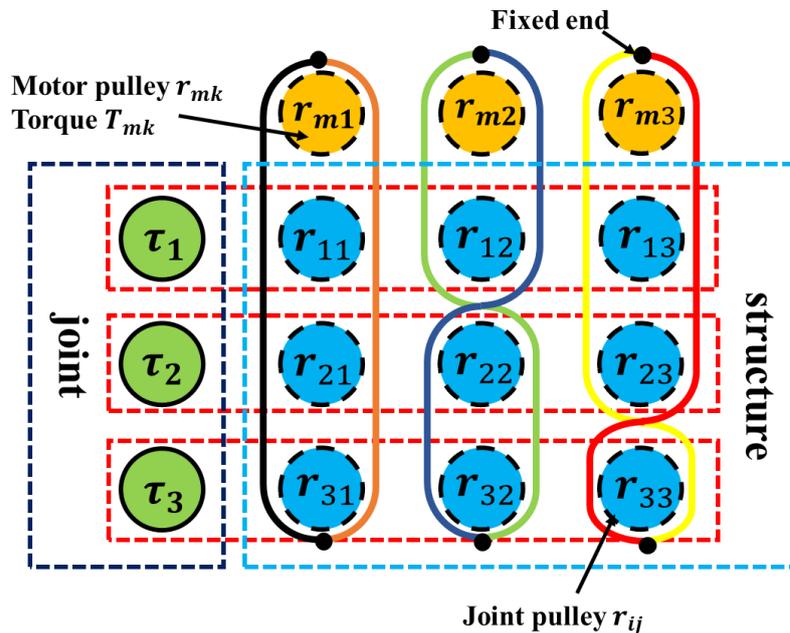


Fig. 4-3. Fully-Routed Motor-Joint form of Wire Routing

図 4-3 は Fully-Routed Motor-Joint 形式のルーティング方法である。黄色の $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{m3}$ はモータープーリーを表す。緑色の $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ は関節で、青色の $r_{11} - r_{33}$  は関節プーリーを表す。この機構は3つのモーター、6本のワイヤ、9つの関節プーリー

で構成される。Fully-Routed Motor-Joint 形式のもっとも大きな特徴は、9つの関節プーリーがあり、各関節に3つの関節プーリーがあることである。つまり、モーターから始まるワイヤは必ず各関節の関節プーリーにルーティングしなければならないということである。

6本のワイヤの片端は、それぞれモータープーリー $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{m3}$ に固定される。ここで、モーターの回転方向と関節プーリーの回転方向が一致するようにルーティングする方向を正方向と決める。例えば関節 $J_1$ では、3つのモーターのワイヤをすべて正方向で関節プーリー $r_{11}$ ,  $r_{12}$ ,  $r_{13}$ にルーティングする。同様に関節 $J_2$ では、モーター1のワイヤを正方向で関節プーリー $r_{21}$ に、モーター2のワイヤを反対方向で関節プーリー $r_{22}$ に、モーター3のワイヤを正方向で関節プーリー $r_{23}$ にルーティングし、関節 $J_3$ ではモーター1のワイヤを正方向で関節プーリー $r_{31}$ に、モーター2のワイヤを反対方向で関節プーリー $r_{32}$ に、モーター3のワイヤを反対方向で関節プーリー $r_{33}$ にルーティングする。

Fully-Routed Motor-Joint 形式ではルーティング方法は1つに限らない。ある関節プーリーにおいてワイヤのルーティング方向は本論と違うが、機構内に9つの関節プーリーがあり、さらに中のトルク行列に逆行列が存在するならば、Fully-Routed Motor-Joint 形式と呼べる。後述のトルク方程式で各関節のトルクとモーターとの間にあるトルク関係及び各関節の角度とモーター角度との間にある関係を考察する。

### 2.1.1 トルク解析

本節では、主にトルク行列とモーターの出力について説明する。第2章の内容から、トルク行列の各要素は関節プーリーとモータープーリーの半径比率であることが分かる。しかし、重要なのはそれらの正負関係である。第2章の(式2.21)と(式2.23)を利用し、 $S$ はワイヤの関節プーリーにおけるルーティング方向を表し、モーターの回転方向と同じであれば正、逆であれば負になる。つまり、モータープーリーから関節プーリーまでの間にワイヤが一回交差するとき、 $S$ の数值は負になりトルク行列に

において対応する要素も負で表される。したがって，Fully-Routed Motor-Joint 形式のトルク行列は以下になる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m2} & r_{13}/r_{m3} \\ r_{21}/r_{m1} & -r_{22}/r_{m2} & r_{23}/r_{m3} \\ r_{31}/r_{m1} & -r_{32}/r_{m2} & -r_{33}/r_{m3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \\ \tau_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

ここで，簡潔に機構の特性を解析するため，(式 4.1) における関節プーリーの半径をモータープーリーの半径と等しくさせる。これを踏まえて整理すると，(式 4.2) がまとめられる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \\ \tau_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

(式 2.24) によって，(式 4.3) は (式 4.2) の逆行列になることが分かる。

$$\begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

(式 4.3) では，列は 1 自由度だけ駆動する場合の各モーターの出力トルクの割合を表す。式 4.2 の中の行は関節の出力トルクを表す。(式 4.3) の中の列に (式 4.2) の対応する行を掛けると，関節トルクの出力についてまとめられる。ここで，モーターの最大出力トルクを 1 に設定し  $\text{Max}(\tau_{m1}, \tau_{m2}, \tau_{m3})=1$  とする。これにより，(式 4.2) と (式 4.3) を参照すれば分かるが，Fully-Routed Motor-Joint 形式では各関節の出力トルクはモーターのトルクの 2 倍になる。これを踏まえて整理すると，表 4-1 がまとめられる。

Table 4-1. Torque of each joint in Fully-Routed Motor-Joint form

Joint	Motor torque			Joint torque
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	
$\tau_1$	1	1	0	2
$\tau_2$	0	-1	1	2
$\tau_3$	1	0	-1	2

表 4-1 から Fully-Routed Motor-Joint 形式の特徴が分かる．例えば関節 $J_1$ しか回転しない場合，関節 $J_1$ の出力トルクはモーター1 の 1 倍のトルクとモーター2 の 1 倍のトルクの合計であり，モーター3 はトルクを提供していないため，その時の関節 $J_1$ の出力トルクはモーターのトルクの 2 倍になる．同様にして，関節 $J_2$ のトルクはモーター2 とモーター3 のトルクを合計した結果，関節 $J_3$ のトルクはモーター1 とモーター3 のトルクを合計した結果であることが分かる．

### 2.1.2 角度解析

本節では，モーター角度と関節角度の間の関係の解析で，Fully-Routed Motor-Joint 形式の角度の特徴について説明する．

(式 2.22) から，モーター角度と関節角度の (式 4.4) がまとめられる．

$$\begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \\ \theta_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

(式 4.5) は (式 4.4) の逆行列であり：

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \\ \theta_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

(式 4.4) の列から, 1 自由度だけ駆動する時の各モーターの回転角度の状況を確認できる. 例えば関節 $J_1$ しか回転しない場合は 3 つのモーターが同じ速度で回転する. そして, (式 4.3) の列と比べると分かるが, 関節 $J_1$ しか回転しない場合, モーター3 は出力に影響しない. 同様に, 関節 $J_2$ しか回転しない時, モーター1 は回転するが出力には影響がなく, 関節 $J_3$ しか回転しない時, モーター2 は回転するが出力には影響しないことが分かる.

そのためこの機構の最大な特徴は, 1 つの関節しか回転しない場合, 1 つのモーターはそれとともに回転すること, つまり, 1 つのモーターは回転だけをトルクの出力はないということである.

## 4.5 1-Unrouted Motor-Joint 形式

1-Unrouted Motor-Joint 形式では、必ず8つの関節プーリーが必要で、またトルク行列に逆行列が存在する。上記二つの条件を満たす機構を 1-Unrouted Motor-Joint 形式と呼ぶ。

本節では、1-Unrouted Motor-Joint 形式のルーティング方法を紹介する。ルーティング方法でトルク関係式を導き、トルク方程式によって各モーターと各関節における回転時の出力トルクの関係、または各モーターの回転角度と各関節の回転角度の関係を確認する。

### 4.5.1 ワイヤルーティングの説明

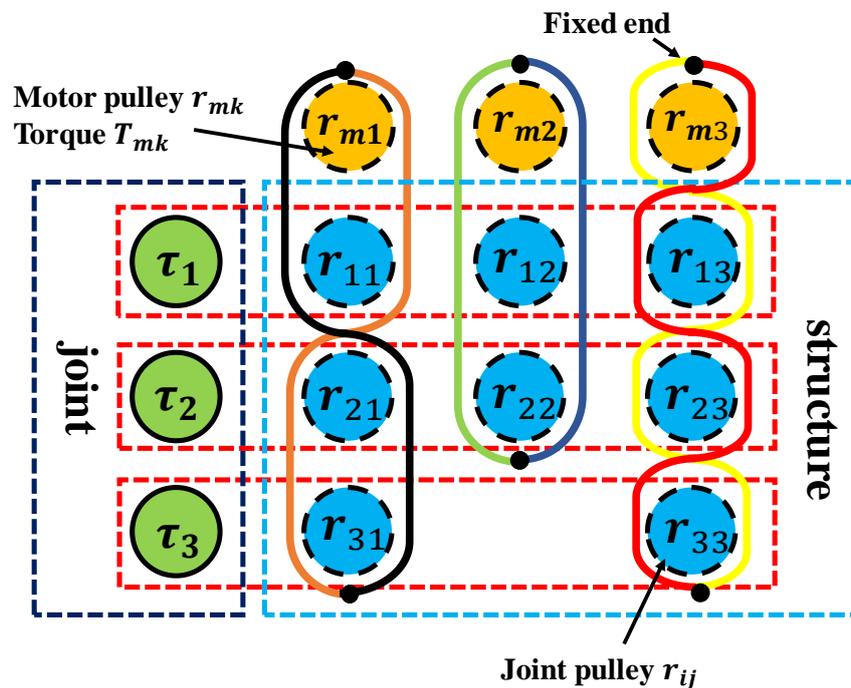


Fig. 4-4. 1-Unrouted Motor-Joint form of Wire Routing

図 4.4 は 1-Unrouted Motor-Joint 形式のルーティング方法である。黄色の  $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{m3}$  はモータープーリーを表す。緑色の  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  は関節で、青色の  $r_{11} - r_{33}$  は関節プー

リーを表す。この機構は3つのモーター、6本のワイヤ、8つの関節プーリーで構成される。1-Unrouted Motor-Joint 形式のもっとも大きな特徴は、この機構が8つの関節プーリーを持ち、3つの関節では、ある1つの関節において2つの関節プーリーしか持たず、ほかの2つの関節にはそれぞれ3つの関節プーリーがあることである。つまり、ある1本のワイヤについてはモーターを起点としてただ2つの関節の関節プーリーにルーティングするが、もう2本のワイヤについてはモーターを起点として各関節における関節プーリーにルーティングするということである。

本機構では、6本のワイヤの片端は、それぞれモータープーリー $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{m3}$ に固定する。ここで、モーターの回転方向と関節プーリーの回転方向が一致するようにルーティングする方向を正方向と決める。これを踏まえ、モーター1のワイヤを正方向で関節プーリー $r_{11}$ に、反対方向で関節プーリー $r_{21}$ と $r_{31}$ にルーティングし、ワイヤを関節 $J_3$ の関節プーリーに固定する。同様にしてモーター2のワイヤを正方向で関節プーリー $r_{12}$ と $r_{22}$ にルーティングし、また関節 $J_2$ の関節プーリーに固定する。さらに、モーター3のワイヤを反対方向で関節プーリー $r_{13}$ と $r_{33}$ に、正方向で関節プーリー $r_{23}$ にルーティングし、関節 $J_3$ の関節プーリーに固定する。

1-Unrouted Motor-Joint 形式では、ルーティング方法は1つに限らない。ある関節プーリーにおいて、ワイヤのルーティング方向は本論と違うが機構内に8つの関節プーリーがあり、さらに中のトルク行列に逆行列が存在するならば1-Unrouted Motor-Joint 形式と呼べる。これ以降はトルク方程式を用いて各関節のトルクとモーターのトルク間の関係及び各関節の角度とモーター角度の間の関係を確認する。

## 4.5.2 トルク解析

本節では、主にトルク行列とモーターの出力について説明する。第2章の内容から、トルク行列の各要素は関節プーリーとモータープーリーの半径比率であることが確認できる。しかし重要なのはそれらの正負関係である。第2章の(式2.21)と(式2.23)を利用し、 $S$ はワイヤの関節プーリーにおけるルーティング方向を表し、モーターの回転方向と同じであれば正、逆であれば負になる。つまり、モータープーリーから関

節プーリーまでの間にワイヤが1回交差するとき  $S$  の数値は負になり、トルク行列において対応する要素も負で表す。したがって、1-Unrouted Motor-Joint 形式のトルク行列は以下のようなになる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m2} & -r_{13}/r_{m3} \\ -r_{21}/r_{m1} & r_{22}/r_{m2} & r_{23}/r_{m3} \\ -r_{31}/r_{m1} & 0 & -r_{33}/r_{m3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

簡潔に機構の特性を解析するため、(式 4.6) における関節プーリーの半径をモータープーリーの半径と等しいものとする。これを踏まえて整理すると (式 4.7) が得られる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

(式 2.24) によって、(式 4.8) は (式 4.7) の逆行列になることが分かる。

$$\begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & -0.25 & -0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ -0.25 & 0.25 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

(式 4.8) では、1 自由度だけ駆動する場合の各モーターの出力トルクの割合を表す。(式 4.7) の中の行は関節の出力トルクを表す。(式 4.8) の中の列に (式 4.7) の対応する行を掛けると関節のトルクの出力についてまとめられる。ここで、モーターの最大出力トルクを1に限定し、 $\text{Max}(\tau_{m1}, \tau_{m2}, \tau_{m3})=1$  とすると、(式 4.7) と (式 4.8) を参照すれば分かるが、1-Unrouted Motor-Joint 形式では、各関節の出力トルクはモーターのトルクの2倍になる。これらを整理すると、表 5.2 が得られる。

Table 4-2. Torque of each joint in Fully-Routed Motor-Joint form

Joint	Motor torque			Joint torque
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	
$\tau_1$	0.5	1	-0.5	2
$\tau_2$	-0.5	1	0.5	2
$\tau_3$	-1	0	-1	2

表 4.2 から 1-Unrouted Motor-Joint 形式の特徴が分かる. 例えば関節 $J_1$ しか回転しない場合, 関節 $J_1$ の出力トルクはモーター1 の 0.5 倍のトルク, モーター2 の 1 倍のトルク, モーター3 の 0.5 倍のトルクの合計である. 同様に考えると, 関節 $J_2$ しか回転しない場合, 関節 $J_2$ の出力トルクはモーター1 の 0.5 倍のトルク, モーター2 の 1 倍のトルク, モーター3 の 0.5 倍のトルクの合計である. しかし関節 $J_3$ だけ回転する場合, 関節 $J_3$ の出力トルクはモーター1 の 1 倍のトルクとモーター3 の 1 倍のトルクの合計である. すなわち関節 $J_3$ においてモーター2 はトルクの出力をしないということである.

### 4.5.3 角度解析

本節では, モーター角度と関節角度の関係の解析で, 1-Unrouted Motor-Joint 形式の角度の特徴について説明する.

(式 2.22) から, モーター角度と関節角度の (式 4.9) がまとめられる.

$$\begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \\ \theta_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

(式 4.10) は (式 4.9) の逆行列であり :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & -0.25 \\ -0.25 & 0.5 & 0.25 \\ -0.5 & 0 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \\ \theta_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

(式4.9)の列から1自由度だけ駆動する時の各モーターの回転角度が確認できる。例えば関節 $J_1$ あるいは関節 $J_2$ しか回転しない場合は3つのモーターが同じスピードで回転するが、関節 $J_3$ しか回転しない場合にはモーター2は回転しない。そして、(式4.8)の列と比べると分かるが、関節 $J_1$ あるいは関節 $J_2$ しか回転しない場合、3つのモーターの出力トルクは異なるが回転のスピードは同じである。また関節 $J_3$ しか回転しない時、モーター2は回転せずトルクの出力もない。

そのためこの機構の最大の特徴は、ある1つの関節が回転する時、ある1つのモーターが完全に動かないことである。

## 4.6 2-Unrouted Motor-Joint 形式

2-Unrouted Motor-Joint 形式では必ず各関節に最低 2 つの関節プーリーを持った上で全体としては7つの関節プーリーがあり、またトルク行列に逆行列が存在する。上記の2つの条件を満たす機構を 2-Unrouted Motor-Joint 形式と呼ぶ。

本節では、2-Unrouted Motor-Joint 形式のルーティング方法を紹介する。ルーティング方法でトルク関係式を導き、トルク方程式によって各モーターと各関節の回転時における出力状況、及びモーターの回転角度と各関節の回転角度の関係を確認する。

### 4.6.1 ワイヤルーティングの説明

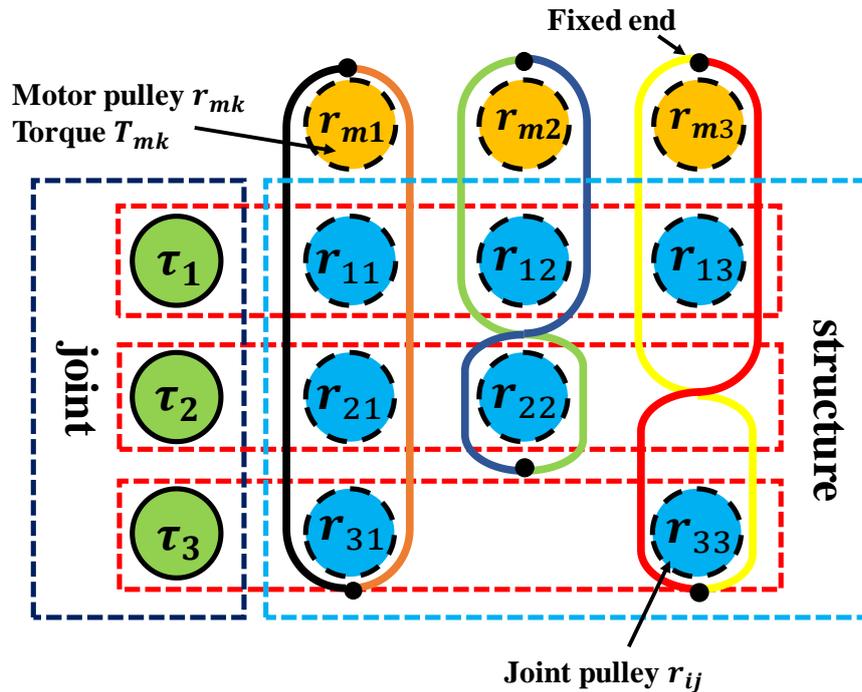


Fig. 4-5. 2-Unrouted Motor-Joint of Wire Routing

図 4-5 は 2-Unrouted Motor-Joint 形式のルーティング方法である。黄色の  $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{m3}$  はモータープーリーを表す。緑色の  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  は関節で、青色の  $r_{11}$  -  $r_{33}$  は関節

プーリーを表す。この機構は、3つのモーター、6本のワイヤ、7つの関節プーリーで構成される。2-Unrouted Motor-Joint 形式のもっとも大きな特徴として、この機構には7つの関節プーリーがあり、3つの関節では、ある1つの関節にしか3つの関節プーリーを持たず、ほかの2つの関節にはそれぞれ2つの関節プーリーだけを持つ。つまり、ある1つのワイヤのみモーターを起点として3つの関節プーリーを経由するが、他の2つのモーターを起点とするワイヤは2つの関節プーリーのみ経由する。

本機構では、6つのワイヤの片端は、それぞれモータープーリー $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{m3}$ に固定する。ここで、モーターの回転方向と関節プーリーの回転方向が一致するようにルーティングする方向を正方向と決める。例えばモーター1のワイヤを正方向で関節プーリー $r_{11}$ ,  $r_{21}$ ,  $r_{31}$ にルーティングするし、ワイヤを関節 $J_3$ の関節プーリーに固定する。同様にモーター2のワイヤを正方向で関節プーリー $r_{12}$ にルーティング、反対方向で関節プーリー $r_{22}$ にルーティングし、最後に関節 $J_2$ の関節プーリーに固定する。さらにモーター3のワイヤを正方向で関節プーリー $r_{13}$ にルーティング、反対方向で関節プーリー $r_{33}$ にルーティングし、最後に関節 $J_3$ の関節プーリーに固定する。

このとき、関節プーリーの位置とルーティング方法が違って構わない。各関節に最低2つの関節プーリーを持った上で全体としては7つの関節プーリーがあり、またトルク行列に逆行列が存在する機構を2-Unrouted Motor-Joint 形式と呼ぶ。これ以降、トルク方程式によって各関節のトルクとモータートルクの間関係、及び各関節の角度とモーター角度の間関係を確認する。

## 4.6.2 トルク解析

本節では、主にトルク行列とモーターの出力について説明する。第2章の内容から、トルク行列の各要素は関節プーリーとモータープーリーの半径比率であることが確認できる。しかし重要なのはそれらの正負関係である。第2章の(式2.21)と(式2.23)を利用し、 $S$ はワイヤが関節プーリーにおけるルーティング方向を表し、モーターの回転方向と同じであれば正、逆であれば負になる。つまり、モータープーリーから関節プーリーまでの間でワイヤが1回交差すると $S$ の数値は負になり、トルク行列にお

いて対応する要素も負で表す。したがって、2-Unrouted Motor-Joint 形式のトルク行列は以下のようなになる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m2} & r_{13}/r_{m3} \\ r_{21}/r_{m1} & -r_{22}/r_{m2} & 0 \\ r_{31}/r_{m1} & 0 & -r_{33}/r_{m3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

簡潔に機構の特性を解析するため、(式 4.11)における関節プーリーの半径をモータープーリーの半径と等しいものとする。これを踏まえて整理すると、(式 4.12)が得られる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

(式 2.24) によって、(式 4.13) は (式 4.12) の逆行列になることが分かる。

$$\begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & -2/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & -2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

(式 4.13) の中の列は、1 自由度だけ駆動する場合の各モーターの出力トルクの割合を表す。(式 4.12) の中の行は、関節の出力トルクを表す。(式 4.13) の中の列に式 4.12 の対応する行を掛けると、関節のトルクの出力についてまとめられる。ここで、モーターの最大出力トルクを 1 に限定し、 $\text{Max}(\tau_{m1}, \tau_{m2}, \tau_{m3})=1$  とする。以上の(式 4.12) と (式 4.13) を参照すると、2-Unrouted Motor-Joint 形式の各関節の出力トルクの特徴が分かる。これを整理すると、表 4.3 が得られる。

Table 4-3. Torque of each joint in 2-Unrouted Motor-Joint form

Joint	Motor torque in different joints			Joint torque
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	
$\tau_1$	1	1	1	3
$\tau_2$	0.5	-1	0.5	1.5
$\tau_3$	0.5	0.5	-1	1.5

表 4.3 から 2-Unrouted Motor-Joint 形式の特徴が分かる．例えば関節 $J_1$ しか回転しない場合，関節 $J_1$ の出力トルクはモーター1 の 1 倍のトルク，モーター2 の 1 倍のトルク，モーター3 の 1 倍のトルクの合計である．次に関節 $J_2$ しか回転しない場合，関節 $J_2$ の出力トルクはモーター1 の 0.5 倍のトルク，モーター2 の 1 倍のトルクである．最後に関節 $J_3$ だけ回転する場合，関節 $J_3$ の出力トルクはモーター1 の 0.5 倍のトルク，モーター3 の 1 倍のトルクである．ここで，式 4.13 から見ればモーター3 は関節 $J_2$ に 0.5 倍のモータートルクを提供し，モーター2 は関節 $J_3$ に 0.5 倍のモータートルクを提供しているが，実際には関節への出力トルクはない．これについて 4.5.3 に説明する．

### 4.6.3 角度解析

本節の内容はモーター角度と関節角度の間にある関係の解析で，2-Unrouted Motor-Joint 形式の角度の特徴について説明する．

(式 2.22) から，モーター角度と関節角度の (式 4.14) が得られる．

$$\begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \\ \theta_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

(式 4.1) は (式 4.14) の逆行列である：

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & -2/3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & -2/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \\ \theta_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

(式 4.14) の列から, 1 自由度だけ駆動する時, 各モーターの回転角度の関係が確認できる. (式 4.13) と (式 4.14) を参照すれば分かるが, 例えば関節 $J_1$ しか回転しない場合, 3 つのモーターが同じスピードで回転し, 出力トルクも同じである. 一方関節 $J_2$ しか回転しない場合, (式 4.14) から見れば分かるが, モーター3 は回転しない.

(式 4.13) から見れば分かるが, モーター3 は 0.5 倍のモータートルクを提供していた. つまり, 関節 $J_2$ しか回転しない場合, モーター3 は回転しないがトルクを提供し, このトルクで機構のバランスを維持している. 同様に関節 $J_3$ しか回転しない場合, モーター2 は 0.5 倍のモータートルクを提供するが回転はしない.

以上よりこの機構の最大の特徴は, 1 自由度だけ駆動する時, 1 つのモーターがトルクを提供するが動かないことにある.

## 4.7 3-Unrouted Motor-Joint 形式

3-Unrouted Motor-Joint 形式では、必ず1つの関節に2つの関節プーリーを持った上で全体としては6つの関節プーリーがあり、またトルク行列に逆行列が要る。上記の2つの条件を満たす機構を3-Unrouted Motor-Joint 形式と呼ぶ。

本節では、3-Unrouted Motor-Joint 形式のルーティング方法を紹介する。ルーティング方法でトルク関係式を導いて、トルク方程式によって各モーターと各関節の回転時における出力状況、及びモーターの回転角度と各関節の回転角度の関係を確認する。

### 4.7.1 ワイヤルーティングの説明

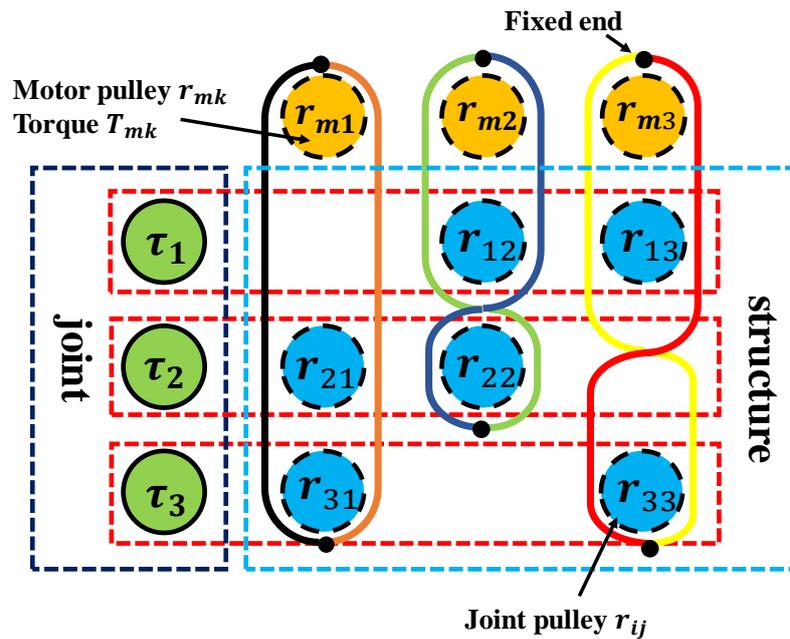


Fig. 4-6. 3-Unrouted Motor-Joint of Wire Routing

図4.6は3-Unrouted Motor-Joint 形式のルーティング方法である。黄色の $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{m3}$ はモータープーリーを表す。緑色の $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$ は関節で、青色の $r_{11}$ – $r_{33}$ は関節プーリーを表す。この機構は、3つのモーター、6本のワイヤ、6つの関節プーリーで構成される。3-Unrouted Motor-Joint 形式のもっとも大きな特徴として、機構には6つの関

節プーリーがあり、各関節には少なくとも2つの関節プーリーがあることである。つまり、モーターから始まるすべてのワイヤが2つの関節プーリーしか通らないということである。

本機構では、6本のワイヤの片端は、それぞれモータープーリー $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $r_{m3}$ に固定する。ここで、モーターの回転方向と関節プーリーの回転方向が一致するようにルーティングする方向を正方向と決める。例えば、モーター1のワイヤは正方向で関節プーリー $r_{21}$ ,  $r_{31}$ にルーティングし、関節 $J_3$ の関節プーリーに固定する。同様にモーター2のワイヤは正方向で関節プーリー $r_{21}$ にルーティングし、反対方向で関節プーリー $r_{22}$ にルーティングし、関節 $J_2$ の関節プーリーに固定する。さらにモーター3のワイヤは正方向で関節プーリー $r_{13}$ にルーティングし、反対方向で関節プーリー $r_{33}$ にルーティングし、関節 $J_3$ の関節プーリーに固定する。

関節プーリーの位置とルーティング方法は違っても構わない。1つの関節に最低2つの関節プーリーを持った上で全体としては6つの関節プーリーがあり、またトルク行列に逆行列が存在する機構ならば **3-Unrouted Motor-Joint** 形式と呼ぶ。これからトルク方程式によって各関節のトルクとモータートルクの間関係、及び各関節の角度とモーター角度の間関係を確認する。

## 4.7.2 トルク解析

本節では、主にトルク行列とモーターの出力について説明する。第2章の内容から、トルク行列の各要素は関節プーリーとモータープーリーの半径比率であることが確認できる。しかし重要なのは、それらの正負関係である。第2章の(式2.21)と(式2.23)を利用し、 $S$ はワイヤが関節プーリーにおけるルーティング方向を表し、モーターの回転方向と同じであれば正、逆であれば負になる。つまり、モータープーリーから関節プーリーまでの間においてワイヤが1回交差するとき $S$ の数値は負になり、トルク行列において対応する要素も負で表す。したがって、**3-Unrouted Motor-Joint Form** 機構のトルク行列は以下になる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_{12}/r_{m2} & r_{13}/r_{m3} \\ r_{21}/r_{m1} & -r_{22}/r_{m2} & 0 \\ r_{31}/r_{m1} & 0 & -r_{33}/r_{m3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

簡潔に機構の特性を解析するため、(式 4.16)における関節プーリーの半径をモータープーリーの半径と等しいものとする。これを踏まえて整理すると、(式 4.17)が得られる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

(式 2.24) によって、(式 4.18) は (式 4.17) の逆行列になることが分かる。

$$\begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & -1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & -1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

(式 4.18) では、1 自由度だけ駆動する場合の各モーターの出力トルクの割合を表す。式 4.17 の中の行は、関節の出力トルクを表す。式 4.18 の中の列に式 4.17 の対応する行を掛けると、関節のトルクの出力についてまとめられる。ここで、モーターの最大出力トルクを 1 に限定し、 $\text{Max}(\tau_{m1}, \tau_{m2}, \tau_{m3}) = 1$  とすると、式 4.17 と 4.18 を参照することで 3-Unrouted Motor-Joint 形式の各関節の出力トルクの特徴が分かる。これを整理すると、表 4.4 が得られる。

Table 4-4. Torque of each joint in 3-Unrouted Motor-Joint form

Joint	Motor torque in different joints			Joint torque
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	
$\tau_1$	1	1	1	2
$\tau_2$	1	-1	1	2
$\tau_3$	1	1	-1	2

表 4.4 から, 3-Unrouted Motor-Joint 形式の特徴が分かる. 例えば関節 $J_1$ しか回転しない場合, 関節 $J_1$ の出力トルクはモーター2 の 1 倍のトルク, モーター3 の 1 倍のトルクの合計である. 同様に関節 $J_2$ しか回転しない場合, 関節 $J_2$ の出力トルクはモーター1 の 1 倍のトルク, モーター2 の 1 倍のトルクの合計である. 最後に関節  $J_3$  だけ回転する場合, 関節 $J_3$ の出力トルクはモーター1 のトルク, モーター3 の 1 倍のトルクである. しかし式 4.18 から見れば, 各関節が回転する時, 3 つのモーターが皆 1 倍のモータートルクを提供している. しかしこのうち 1 つのモーターからの関節への出力トルクはない. これについて 4.6.3 に説明する.

### 4.7.3 角度解析

本節の内容はモーター角度と関節角度の間の関係の解析で, 3-Unrouted Motor-Joint 形式の角度の特徴について説明する.

(式 2.22) から, モーター角度と関節角度の行列 4.19 がまとめられる.

$$\begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \\ \theta_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

(式 4.20) は (式 4.19) の逆行列であり :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & -1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & -1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{m1} \\ \theta_{m2} \\ \theta_{m3} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

(式 4.19) の列から, 1 自由度だけ駆動する時, 各モーターの回転角度の関係が確認できる. (式 4.18) と (式 4.19) を参照すれば分かるが, 例えば関節 $J_1$ しか回転しない場合, 3 つのモーターの出力トルクは同じであるがモーター1 は回転しない. 同様

に関節 $J_2$ しか回転しない場合, 3つのモーターの出力トルクは同じであるがモーター3が回転せず, 関節 $J_3$ しか回転しない場合, 3つのモーターの出力トルクは同じであるがモーター2は回転しない. つまり, この機構では各関節が回転する時, それぞれ1つのモーターが1倍のモータートルクで機構のバランスを維持しているのである.

## 4.8 4 種類の機構解析の対比

3M3D ワイヤ干渉駆動モジュールに対して、ワイヤルーティング方法とワイヤルーティング行列だけを知ればいいわけではなく、4 種の形式の相違点と特徴を研究する必要がある。その際、簡潔に4 種の形式の相違点と特徴を研究するためにここではモータープーリーの半径を関節プーリーの半径と等しく、つまり  $r_{mi} = r_{ij}$  としている。2.4 節の  $T = A^T T_m$  によれば、以下の4 種のワイヤルーティング行列が得られる。

Fully-Routed Motor-Joint 形式のワイヤルーティング行列  $A_1$ :

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

1-unrouted motor-joint 形式のワイヤルーティング行列  $A_2$ :

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

2-unrouted motor-joint 形式のワイヤルーティング行列  $A_3$ :

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

3-unrouted motor-joint 形式のワイヤルーティング行列  $A_4$ :

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

2.4 節によって、モーター角度と関節角度の関係、およびモータートルクと関節トルクをそれぞれ確認する。3 つの関節のうち1 つの関節しか回転せずトルク

もある場合、 $\Delta\theta_{Lj}$ をその関節の回転角度、 $\Delta\tau_{Lj}$ をその関節の出力トルクとする。ここで、 $j$ は関節番号( $j = 1,2,3$ )である。 $\theta_{mi}^j$ と $\tau_{mi}^j$ はそれぞれ、モーター $i$ が関節 $j$ で回転または出力するときの角度とトルクを表す。 $A_k$ で上記の4種のワイヤルーティング方法のワイヤルーティング行列を表す。

$$\begin{bmatrix} \theta_{m1}^1 & \theta_{m1}^2 & \theta_{m1}^3 \\ \theta_{m2}^1 & \theta_{m2}^2 & \theta_{m2}^3 \\ \theta_{m3}^1 & \theta_{m3}^2 & \theta_{m3}^3 \end{bmatrix} = A_k \begin{bmatrix} \Delta\theta_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\theta_{L2} & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\theta_{L3} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{m1}^1 & \tau_{m1}^2 & \tau_{m1}^3 \\ \tau_{m2}^1 & \tau_{m2}^2 & \tau_{m2}^3 \\ \tau_{m3}^1 & \tau_{m3}^2 & \tau_{m3}^3 \end{bmatrix} = A_k \begin{bmatrix} \Delta\tau_{L1} & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\tau_{L2} & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\tau_{L3} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Table 4-5. Comparison of 4 forms

	motor-joint routing matrix	joint		Motor 1		Motor 2		Motor 3		Joint torque
		$\theta_{Lj}$	$\tau_{Lj}$	$\theta_{m1}$	$\tau_{m1}$	$\theta_{m2}$	$\tau_{m2}$	$\theta_{m3}$	$\tau_{m3}$	
Fully-Routed Motor-Joint form	$A_1$	$\Delta\theta_{L1}$	$\Delta\tau_{L1}$	1*	1/2*	1*	1/2*	1*	0*	2**
		$\Delta\theta_{L2}$	$\Delta\tau_{L2}$	1	0	-1	-1/2	1	1/2	2
		$\Delta\theta_{L3}$	$\Delta\tau_{L3}$	1	1/2	-1	0	-1	-1/2	2
1-Unrouted Motor-Joint form	$A_2$	$\Delta\theta_{L1}$	$\Delta\tau_{L1}$	1	1/4	1	1/2	-1	-1/4	2
		$\Delta\theta_{L2}$	$\Delta\tau_{L2}$	-1	-1/4	1	1/2	1	1/4	2
		$\Delta\theta_{L3}$	$\Delta\tau_{L3}$	-1	-1/2	0	0	-1	-1/2	2
2-Unrouted Motor-Joint form	$A_3$	$\Delta\theta_{L1}$	$\Delta\tau_{L1}$	1	1/3	1	1/3	1	1/3	3
		$\Delta\theta_{L2}$	$\Delta\tau_{L2}$	1	1/3	-1	-2/3	0	1/3	1.5
		$\Delta\theta_{L3}$	$\Delta\tau_{L3}$	1	1/3	0	1/3	-1	-2/3	1.5
3-Unrouted Motor-Joint form	$A_4$	$\Delta\theta_{L1}$	$\Delta\tau_{L1}$	0	1/2	1	1/2	1	1/2	2
		$\Delta\theta_{L2}$	$\Delta\tau_{L2}$	1	1/2	-1	-1/2	0	1/2	2
		$\Delta\theta_{L3}$	$\Delta\tau_{L3}$	1	1/2	0	1/2	-1	-1/2	2

\* ratio to  $\Delta\theta_j$  or  $\Delta\tau_j$ 

\*\* ratio to motor torque

(式 4.25) と (式 4.26) により, 各ワイヤルーティング方式を採用した際, 1つの関節しか回転しない, または出力しない時の各モーターの状態がわかる. 結果を表 4-5 にまとめる.

表 4-5 は, 各ルーティング方式について 1つの関節のみ $\Delta\theta_{jj}$ で回転し, トルクが $\Delta\tau_{jj}$ になる場合, 各モーターの角度とトルクとの関係を示している. 番号 $A_1$ は, Fully routed motor-joint form のワイヤルーティング行列,  $A_2$ は, 1-unrouted motor-joint form のワイヤルーティング行列,  $A_3$ は, 2-unrouted motor-joint form のワイヤルーティング行列,  $A_4$ は 3-unrouted motor-joint form のワイヤルーティング行列である. 表の列について, モーター角度 $\theta_{mi}$ とトルク $\tau_{mi}$ の数値は, 関節が $\Delta\theta_{jj}$ の角度で回転し,  $\Delta\tau_{jj}$ のトルクが出る倍数を表す. 関節トルクは 1つの関節のみトルクが出る場合, この関節におけるトルクの理論上の最大値を表す. ここで,  $\text{Max}(\tau_{m1}) = \text{Max}(\tau_{m2}) = \text{Max}(\tau_{m3}) = 1$  である.

Table 4-6. Motor status in 4 forms

Structure	joint	Motor 1		Motor 2		Motor 3	
		Angle	Torque	Angle	Torque	Angle	Torque
Fully-Routed Motor-Joint form	$J_1$	Y	Y	Y	Y	Y	N
	$J_2$	Y	N	Y	Y	Y	Y
	$J_3$	Y	Y	Y	N	Y	Y
1-Unrouted Motor-Joint form	$J_1$	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	$J_2$	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	$J_3$	Y	Y	N	N	Y	Y
2-Unrouted Motor-Joint form	$J_1$	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	$J_2$	Y	Y	Y	Y	N	Y
	$J_3$	Y	Y	N	Y	Y	Y
3-Unrouted Motor-Joint form	$J_1$	N	Y	Y	Y	Y	Y
	$J_2$	Y	Y	Y	Y	N	Y
	$J_3$	Y	Y	N	Y	Y	Y

4種のルーティング方式を比較するとき、最も明らかな違いは2-unrouted motor-joint formの関節トルクが他のルーティング方式の関節トルクと異なることである。他の3種のルーティング方式については、関節トルクは同じだが関節角度とトルクを実現したときの3つのモーターの状態が異なる。たとえば、表4-6では、4種のワイヤルーティング方式で関節3のみが回転し、トルクがある場合、Fully routed motor-joint formのモーター2は回転するがトルクが出ない。言い換えれば、このモーターは関節3のみに従って回転しトルクを提供しないということである。1-unrouted motor-joint formでは、モーター2は回転もせずトルクも出ない。2-unrouted motor-joint form and 3-unrouted motor-joint formでもモーター2は同じ状態にあり、回転せずトルクのみ提供する。これはこの2つのルーティング方式において、関節3のみが回転して出力の場合、モーターは他の関節を静止状態に保つために一定の割合のトルクを必要とすることを意味する。

干渉駆動では、モーターも4つの状態に分かれる。これらの状態はすべて本論文の3モーター3自由度干渉に反映されている。1.モーターが回転しトルクが出る。これはモーターが正常に動作しているときの状態であり、物に対して仕事を行っている状態でもある。2.モーターは回転するがトルクが出ない。3.モーターは回転しないがトルクが必要である。この2つのモーターの状態は干渉駆動でよく発生する。状態2について、この場合のモーターはフォローアップ動作、過渡的な役割を果たす。例えば、Fully-Routed Motor-Joint formにあるモーターが挙げられる。状態3について、この場合のモーターは主にシステムのバランス、または位置を維持する役割を果たす。例えば、2-Unrouted Motor-Joint formにあるモーターが挙げられる。4.モーターは回転もせずトルクも出ない。これは、モーターは関節と関係がないことを意味する。例えば、1-Unrouted Motor-Joint formにあるモーターが挙げられる。

## 4.9 まとめ

人体の関節のほとんどは、2 自由度と 3 自由度の関節で構成されている。人型ロボットを実現し、ロボットの精度とメンテナンス性を最大化するためには、マルチモジュールの組み合わせ方式を採用する必要がある。第 3 章にて 2 モーター2 自由度干渉駆動モジュールが実現されたが、3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールはまったく新しい分野である。本章では、3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールの実現、開発と応用の問題を解決できた。

本章では、3 モーター3 自由度ワイヤ干渉駆動のための可能なワイヤルーティング形式の分類、解析と比較を行う。省略された関節プーリーの数により、3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールのワイヤルーティング形式を 4 種類に分類する。それぞれ Fully-Routed Motor-Joint 形式、1-Unrouted Motor-Joint 形式、2-Unrouted Motor-Joint 形式、3-Unrouted Motor-Joint 形式と呼ぶ。そして、関節プーリーの位置、ワイヤルーティング形式による干渉駆動の特性について比較する。

4 つの機構では関節プーリーの位置やワイヤのルーティング方向も変更できる。

機構において 9 つの関節プーリーがあり、さらにトルク行列に逆行列が存在する機構は、Fully-Routed Motor-Joint 形式と呼ぶ。

機構において 8 つの関節プーリーがあり、さらにトルク行列に逆行列が存在する機構は、1-Unrouted Motor-Joint 形式と呼ぶ。

機構において、1 つの関節に少なくとも 2 つの関節プーリーを持ち、全体では 7 つの関節プーリーがあり、さらにトルク行列に逆行列が存在する機構は、2-Unrouted Motor-Joint 形式と呼ぶ。

機構において、1つの関節に少なくとも2つの関節プーリーを持ち、全体では6つの関節プーリーがあり、さらにトルク行列に逆行列が存在する機構は、**3-Unrouted Motor-Joint** 形式と呼ぶ。

## 第5章 7自由度ロボットアーム

---

5.1	はじめに.....	115
5.2	7自由度ワイヤ干渉駆動ロボットアームの設計開発.....	116
5.2.1	剛性と柔軟性を併せ持つ.....	116
5.2.2	人と同じ運動学の重要性.....	117
5.2.3	ロボットアームのモジュール分割.....	117
5.3	ロボットアーム—Aタイプの開発.....	120
5.3.1	各関節のワイヤルーティング形式の選択.....	120
5.3.1.1	肩関節モジュール.....	120
5.3.1.2	肘関節モジュール.....	124
5.3.1.3	手首関節モジュール.....	126
5.3.2	ロボットアーム— Aタイプの全体像.....	128
5.4	ロボットアーム— Bタイプの開発.....	130
5.4.1	各関節のワイヤルーティング形式の選択.....	130
5.4.1.1	肩関節モジュール.....	130
5.4.1.2	肘関節モジュール.....	136
5.4.1.3	手首関節モジュール.....	139
5.4.2	ロボットアーム— Bタイプの全体像.....	141
5.5	ワイヤ張力調整機構.....	143
5.5.1	中空ねじ式.....	143
5.5.2	メカロックまたワンウェイクラッチ式.....	145
5.5.3	プーリー式.....	146
5.6	干渉と非干渉の共存.....	148
5.6.1	ユニバーサルジョイント式.....	149

---

5.6.2	可動アイドラープーリー式.....	150
5.6.3	2-DoF ローリングジョイント.....	152
5.7	ロボットアームの評価実験.....	153
5.7.1	ロボットアームの制御システム.....	153
5.7.2	角度及び消費電流の検証実験.....	153
5.7.3	ロボットアーム- Aタイプの検証実験.....	154
5.7.3.1	角度の検証実験.....	155
5.7.3.2	消費電流の検証実験.....	159
5.7.4	ロボットアーム- Bタイプの検証実験.....	163
5.7.4.1	角度の検証実験.....	164
5.7.4.2	消費電流の検証実験.....	168
5.7.5	繰り返し精度に関する評価実験.....	172
5.7.5.1	ロボットアーム- Aタイプの精度実験.....	173
5.7.5.2	ロボットアーム- Bタイプの精度実験.....	178
5.7.6	トルクに関する評価実験.....	182
5.7.6.1	関節トルクの推定.....	182
5.7.6.2	最大負荷.....	184
5.8	まとめ.....	185
5.8.1	ロボットアームの仕様.....	185
5.8.2	ロボットアームの考察.....	189

---

## 5.1 はじめに

本章は，モジュール化の応用を紹介し，ワイヤ張力調整機構と干渉及び非干渉の共存についてまとめた．本論文は，2種の7自由度のロボットアームを開発し，それに対する評価実験を行った．

## 5.2 7自由度ワイヤ干渉駆動ロボットアームの設計開発

ロボットアームは、人と直接接触する外部機械であり、人とインタラクションし、患者に直接取り付けることができる。どのような場合でも、ロボットアームに出力の高さ、および軽量性が求められる。本論文では、2モーター2自由度と3モーター3自由度ワイヤ干渉駆動の関節モジュールを開発した。干渉駆動は、ロボットアームの高出力と軽量の問題を解決するために使用される。モジュール化は、ロボットアームの保守性を解決し、精度を向上させるために使用される。

第3章と第4章の内容に基づいて、AタイプとBタイプの二種のロボットアームを開発した。本節では、主に二種のロボットアームの設計原理、ワイヤのルーティング方法、ワイヤの張力調整の解決案、および特定の状況におけるワイヤ干渉と非干渉の共存の解決案について説明する。

### 5.2.1 剛性と柔軟性を併せ持つ

なぜならば、ワイヤは小型、軽量、柔軟といった利点を同時に持ち、ロボットアームの自重と体積を減らすことができ、人間とのインタラクションにもっと安全だからである。しかし、ワイヤの駆動にいくつかの欠点もある。まず、柔軟性が両刃の剣でもある。柔軟性を持つことで、ロボットアームの安全性を向上させることができるが、精度を低下させる。それは、ワイヤがアクチュエータから関節の末端まで移動する距離が長くなればなるほど、弾性変形の可能性が大きくなり、精度に大きな影響を与えるからである。また、金属疲労により、長時間の負荷でワイヤが変形してしまう。ロボットアームは、剛性と柔軟性を併せ持つため、ワイヤの張力を調整する機構が必要である。

## 5.2.2 人と同じ運動学の重要性

人の腕の運動学と同じロボットアームはより高い汎用性と実用性を兼ね備える。人とインタラクションをしたり義肢として遠隔操作で人をサポートしたりするとき、このようなロボットアームは患者の訓練時間を減らし、操作を容易にできる。また、人間の運動学と同じであることで、潜在的な危険を回避することができる。特に義肢とするとき、このようなロボットアームは患者が使用する上で扱いやすいと考えられる。そのため、7自由度かつ人の運動学と同じロボットアームの開発が必要だと考えている。

## 5.2.3 ロボットアームのモジュール分割

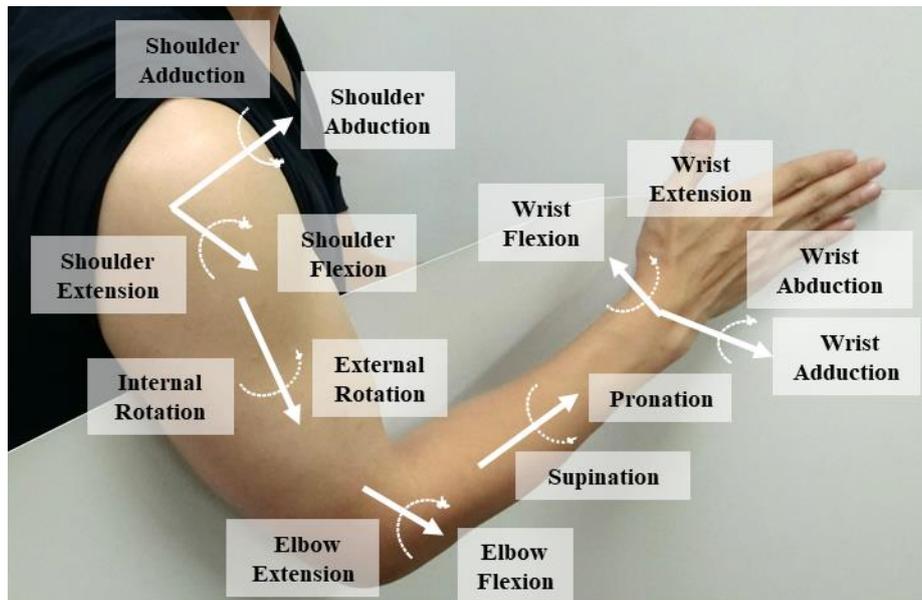


Fig. 5-1. Movements of Human Arm

人間の腕には、手を除いて7つのDOFがある(図5-1)。肩関節は球関節であり、上腕の前方挙上(屈曲)と後方挙上(伸展)が関節の内側軸と外側軸を中心に行っている。上腕の横方向の挙上(外転)と手足の正中線に向かう動き(内転)。上腕を外側(外旋)

および内向き（内旋）にひねる動き．上腕の前方挙上（屈曲）と後方挙上（伸展）は，関節の内側軸と外側軸の中心にあり．上腕の横方向の挙上（外転）は前後軸を中心とし，その動きによって上腕の挙上が体幹に引き付けられる（内転）．上腕を外側にねじる動き（外旋）と上腕を内側にねじる動き（内回転）が観察される．肘関節は，屈曲と伸展の動きしか実行できない一軸関節である．この場合，肘関節を水平に横切る移動軸は1つだけである．前腕では，前腕の骨（橈骨と尺骨）がほぼ平行に配置され，軸を形成する．前腕の骨は，前腕のねじれ運動（回内および回外）を可能にする．一方，橈骨は尺骨の周りを移動するように形作られている．手首関節は二軸関節であり，手首を曲げたり伸ばしたりすることができる．これらの動きは比較的大きい．横に傾く動き，すなわち外転と内転の動きは比較的小さい．

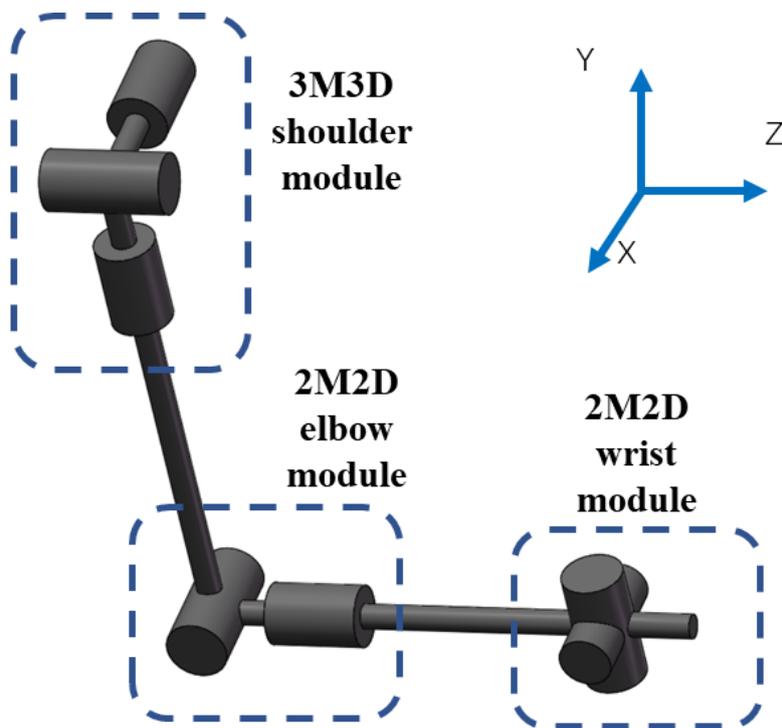


Fig. 5-2. The module design of Humanoid Robot Arm

本論文は，ワイヤ駆動ロボットアームは精度を高めるため，モジュール化の設計を提案し，7自由度ロボットアームを三つの関節モジュールに分ける(図 5-2)．人の肘関節には1自由度，また肘関節と手首関節の間の一つの回転自由度，手首関節の2自由

度を加え、総計4自由度がある。ロボットアームの出力を高め、または人のアームの運動学に一致させるため、本論文ではこの4自由度を二つの2自由度干渉駆動モジュールに分ける。前腕をねじる運動(回内,回外)と肘関節の屈曲・伸展運動を一つの2自由度干渉駆動モジュールに統合する。肩関節には3自由度を設け、回転順位はそれぞれ屈曲・伸展—外転・内転—外旋・内旋であり、人の肩関節の運動に一致する。

モジュール化することにより、モーターと関節とを繋ぐワイヤを短縮し、ワイヤ長に比例するワイヤの伸縮を抑えることで、制御精度を高める。また、ワイヤを介してモーターの出力を再配分することで、より小さいモーターで必要なトルクを得られるため、全体の軽量化につながる。3モーター3自由度干渉駆動関節モジュールは2モーター2自由度干渉駆動関節モジュールよりもトルクが大きくなる。3モーター3自由度干渉駆動関節モジュールのモーター数が増えると、自重も増加した。したがって、3モーター3自由度干渉駆動関節モジュールは肩関節への適用に適している。本論文では、肘と手首関節を実現するための2M2D干渉駆動モジュールと肩関節を実現する3M3Dを提案する。

## 5.3 ロボットアーム—A タイプの開発

ロボットアーム A タイプは、3 モーター3 自由度ワイヤ干涉駆動関節を採用する最初のロボットアームである。モジュール化設計もはじめてロボットアームに運用され、各モジュールがワイヤ干涉によって駆動される。このロボットアーム開発の主な目的は、次のことを検証することである。第一に、2 モーター2 自由度ワイヤ干涉駆動および3 モーター3 自由度ワイヤ干涉駆動の性能を検証する。第二に、ワイヤ干涉駆動は関節トルクを上げれるかどうかを検証する。第三に、モジュール化設計により、精度と保守性が上げられたかどうかを検証する。

本節は、主にロボットアーム-A タイプの各モジュールの機構設計と原理について説明する。

### 5.3.1 各関節のワイヤルーティング形式の選択

#### 5.3.1.1 肩関節モジュール

ロボットアームの肩関節は最も重要であり、開発も最も困難である。肩関節モジュールでは、各回転関節がロボットアームの重量を支えながら、末端の出力トルクを確保する必要がある。2 モーター2 自由度ワイヤ干涉駆動と3 モーター3 自由度ワイヤ干涉駆動を比較すると、3 モーター3 自由度ワイヤ干涉駆動のほうがより高い出力トルクと柔軟性を持つことがわかる。3 モーター3 自由度ワイヤ干涉駆動の自重も大きいため、肩関節に取り付けることによって慣性トルクを低減することができる。したがって、3 モーター3 自由度ワイヤ干涉駆動はロボットアームの肩関節に適している。

肩関節のワイヤルーティング方法は 1-Unrouted Motor-Joint 形式を採用した。3 モーター3 自由度干涉駆動モジュールをできるだけ小型にするため、本論文では、2 モーター2 自由度干涉駆動モジュールの開発を参照したうえ、モーターを機構内部に置き、3 つのモーターもそれぞれ3 つの関節に配置し、肩関節のサイズを縮小することができた。

実験から発見したことは、関節が衝突に遭ったとき、または負荷テストにかけた場合、関節 $J_1$ におけるモーター $M_2$ が高負荷運動状態になり、モーター $M_2$ を通した電流をより大きく、温度もより高くさせてしまう。これにより、ロボットアームが長期間稼働できなくなる。以上のことから、肩関節 $J_1$ と $J_2$ の出力トルクが最大である、ロボットアームが正常に働くことを確保するために、モーター $M_2$ に対して減速することにした。図5-3は実現した3モーター3自由度干渉駆動のワイヤのルーティング方法である。図5-4は開発した関節である。ワイヤがモーター $M_1$ のモータープーリー $r_{m1}$ から始まり、関節プーリー $r_{21}$ を通して、関節プーリー $r_{31}$ で終わる。しかし、関節プーリー $r_{31}$ はモーター $M_3$ の固定子端と固定され、ワイヤは最終的に中空ねじを通してモーター $M_3$ に固定され、モーター $M_3$ の固定子の回転も関節 $J_3$ の回転に形成した。モーター $M_2$ のワイヤが関節 $J_3$ の関節プーリーを通らないため、ワイヤがモーター $M_2$ のモータープーリーから始まり、直接に関節 $J_1$ の関節プーリー $r_{12}$ にルーティングする。最終的に、ワイヤが中空ねじを通してモーター $M_1$ と固定される。機構全体がモーター $M_1$ をめぐって回転するのも関節 $J_1$ の回転になり、モーター $M_2$ の固定子の回転も関節 $J_2$ の回転になる。同様に、ワイヤがモーター $M_3$ のモータープーリー $r_{m3}$ から始まり、関節 $J_2$ の関節プーリー $r_{23}$ を通して、関節 $J_1$ の関節プーリー $r_{13}$ で終わる。最終的に、ワイヤが中空ねじを通してモーター $M_1$ の固定子に固定する。

従って、モーター2のモータープーリーを他のプーリーの0.5倍にする。 $M_2$ のモータープーリーのほか、すべてのプーリーが等しくなる場合、トルク方程式がまとめられる(式5-1)。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{m1} \\ T_{m2} \\ T_{m3} \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

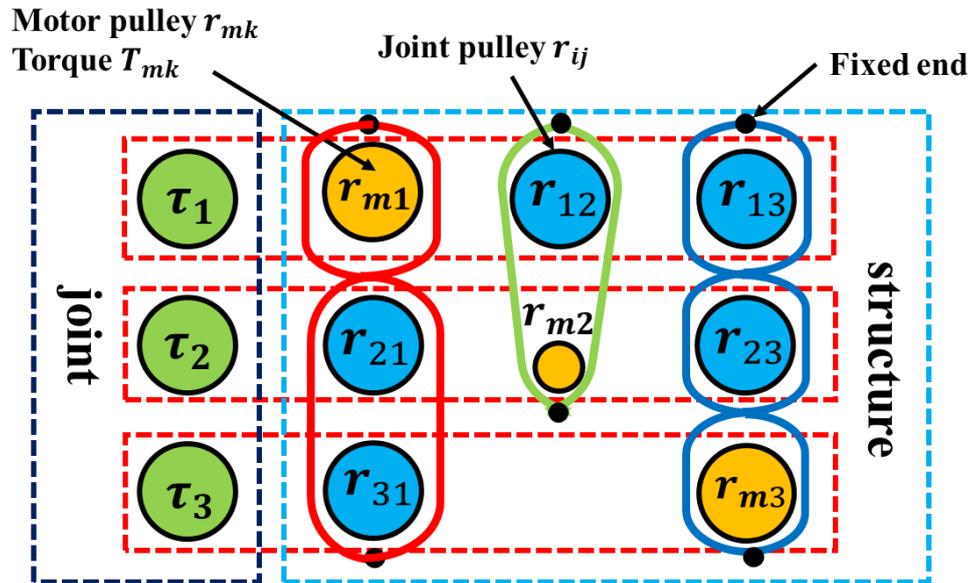


Fig. 5-3. The wire routing diagram of robot arm A type (Shoulder joint).

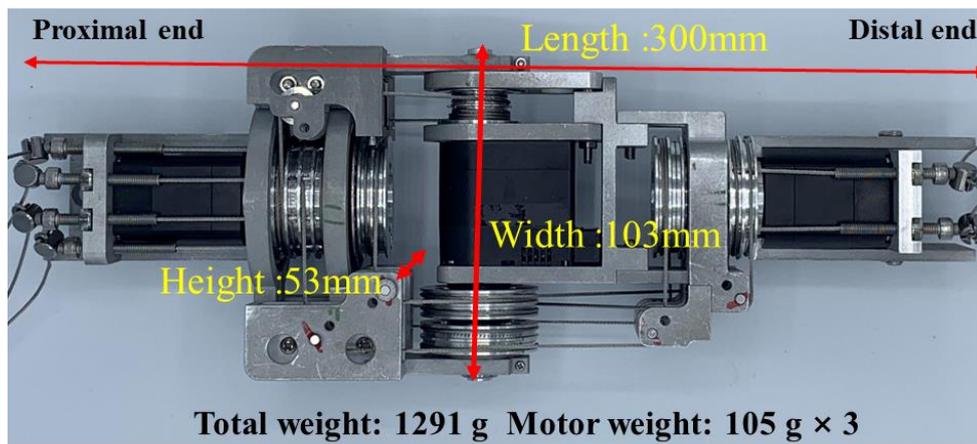


Fig. 5-4. Photo of the robot arm A type(Shoulder joint).

(式 5-1)が示された方程式は現にある肩関節のトルク方程式である。モーター $M_2$ のプーリー半径を変えることで、関節モジュールが負荷運動のもと、三つのモーターの出力トルクを等しい倍数で増大または減少させる。つまり、半径比率を変える前、関節が負荷運動をする際、モーター $M_2$ が出力の限界に達しても、モーター $M_1$ と $M_2$ はモーター限界の 50%のトルクにしか達していなかった。しかしながら、今は同じように、関節が負荷運動をする際、三つのモーターが受けた力は均一で、それと同時に、

モーターの出力限界に達することができ、関節の出力トルクを高めたほか、ロボットアームの使用寿命も伸ばした。

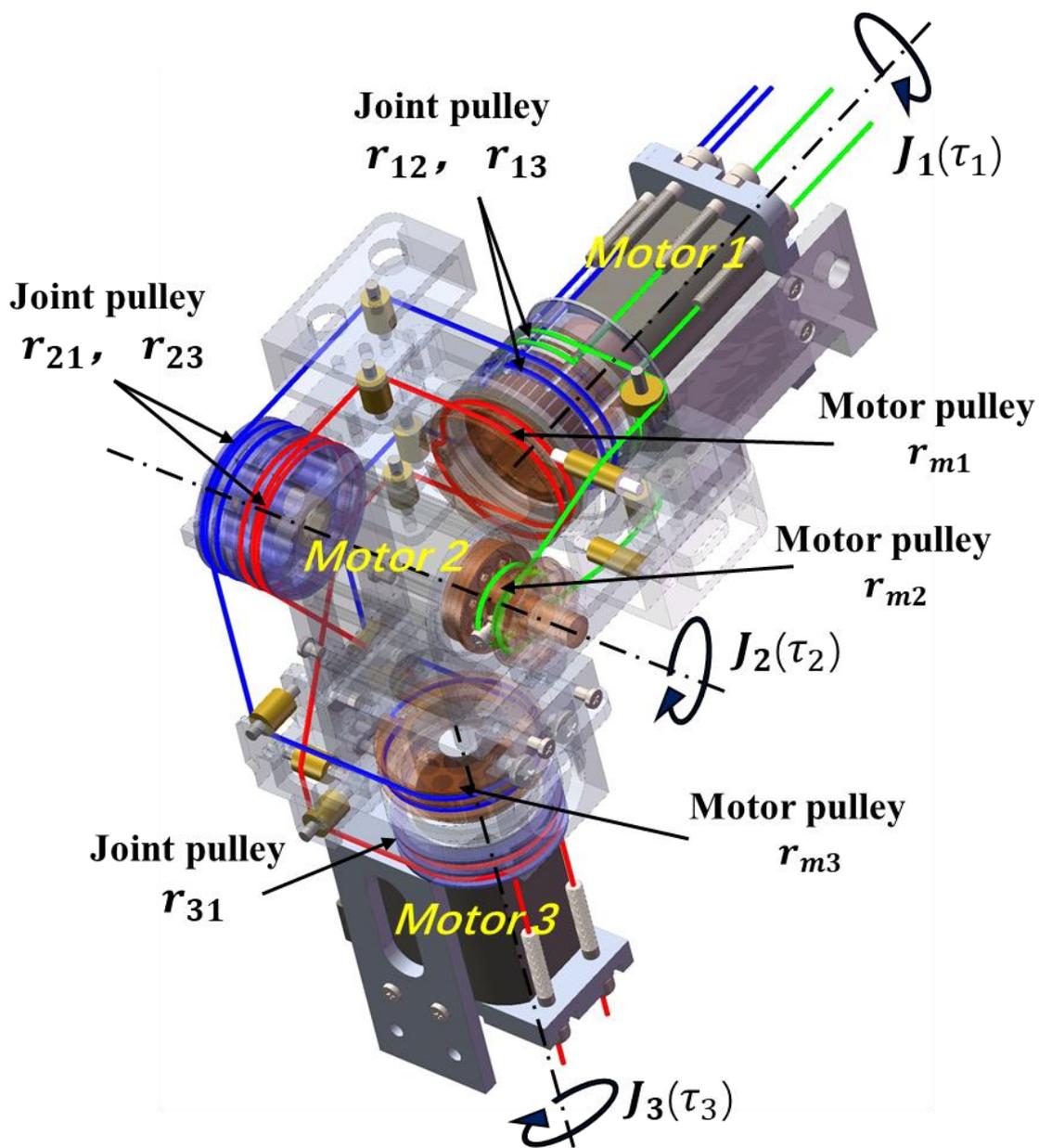


Fig. 5-5. Design drawing of the robot arm A type(Shoulder joint).

### 5.3.1.2 肘関節モジュール

サイズと位置のため、肘関節の選択肢は多くない。2 モーター外付け機構と2 モーター内蔵同軸機構のサイズが大きすぎるため、採用しない。2 モーター内蔵異軸機構の増益がもっとも低いため、本論文では、この機構の実現ができなかった。

ロボットアーム-A タイプの肘関節は、1 モーター外付け機構を使用する。プーリーの半径比率が変更されたこの機構は、2 モーター外付け機構ほど性能は良くないが、モータープーリーと関節プーリーが等しい設計はロボットアーム-A タイプの設計要件を満たすのに十分であるため、このロボットアームの肘関節は1 モーター外付け機構を使用する。図 5-6 は肘関節のワイヤのルーティング図である。図 5-6 によって、肘関節のトルク方程式 (5-2) が書ける。

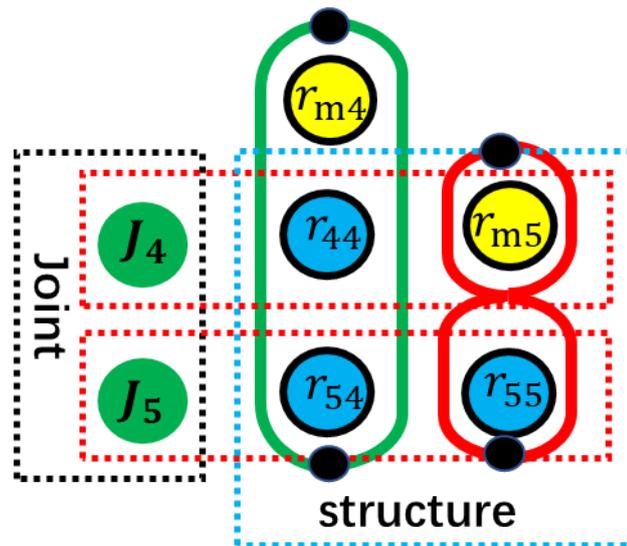


Fig. 5-6. The wire routing diagram of robot arm A type (Elbow joint).

$$\begin{bmatrix} \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{44}/r_{m4} & 1 \\ r_{54}/r_{m4} & -r_{55}/r_{m5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m4} \\ \tau_{m5} \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

図 5-7 は、肘関節の設計図である。肩関節は 3.6 節で説明した機構と同じで、2つのモーターと2本のワイヤで構成されている。緑色のワイヤの一端がモーター4に固定され、関節4の関節プーリー $r_{44}$ にルーティングし、モーター5のワイヤのルーティング方法は、モーター4と同じで、最終的には関節5のプーリーにルーティングする。異なっている点は、第一に、モーター5のモータープーリーは関節と同軸であるため、トルク方程式を計算するとき、モータープーリー $r_{m5}$ は関節プーリー $r_{45}$ に置き換わるということである。第二に、モーター4のワイヤとモーター5のワイヤは、関節5のプーリーに左右からルーティングする。2.4.3の内容から、関節5が回転すると、2つのモーターの方向は反対で、モーター5のワイヤは、1回の交差後に関節5にルーティングする必要があると考えられる。最後に、2本のワイヤを関節5の中空ネジに固定し、これは、ワイヤの予荷重力を調整するための機構でもある。図 5-8 は、サイズと重量を含む肘関節の写真である。

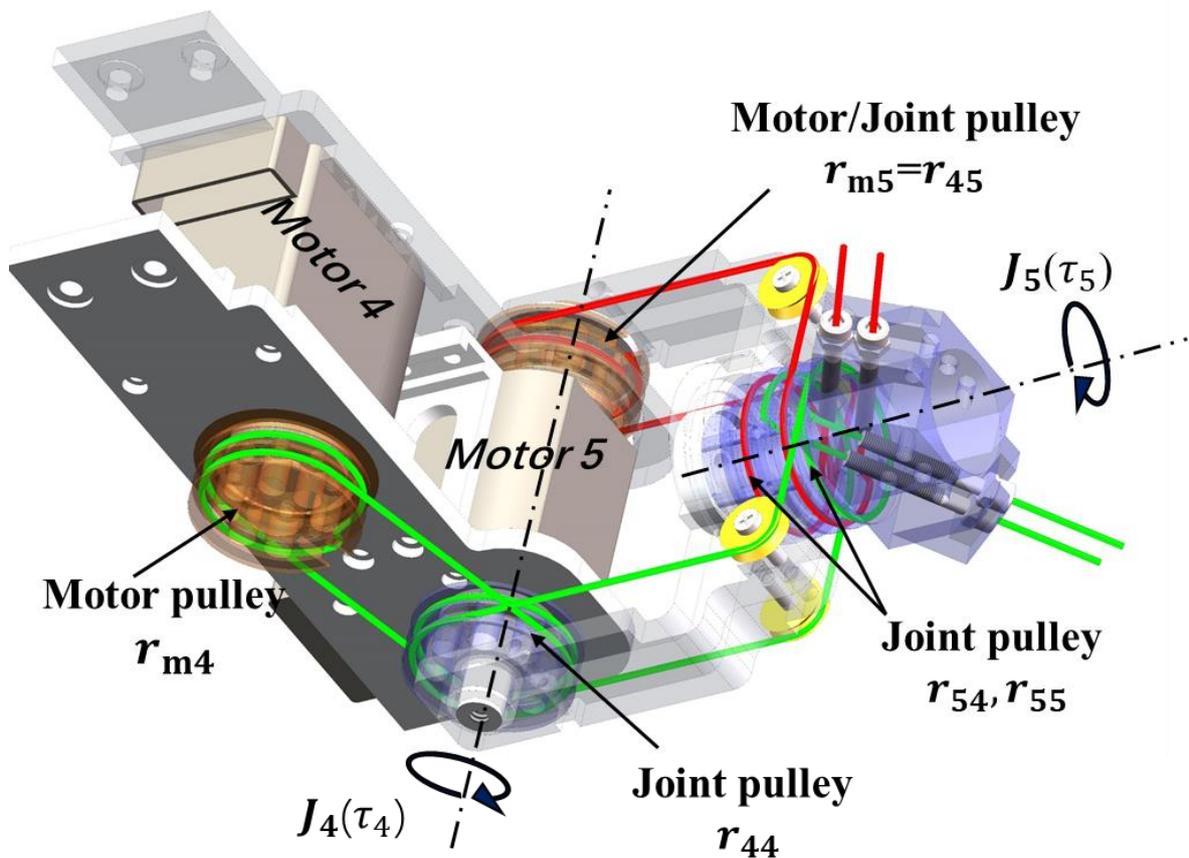


Fig. 5-7. Design drawing of the robot arm A type(Elbow joint)

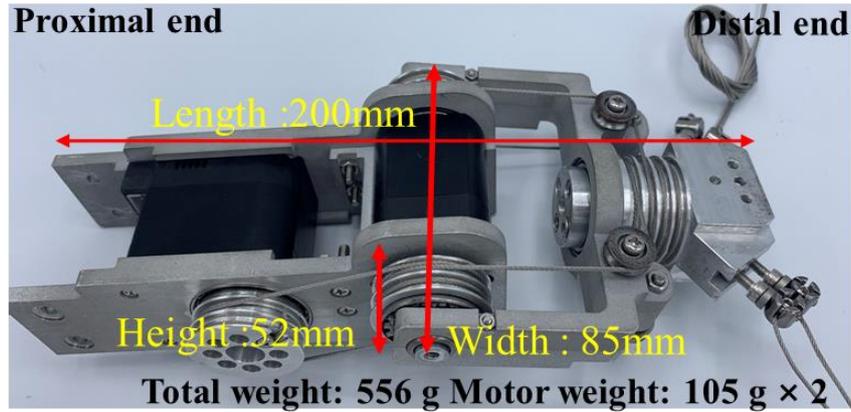


Fig. 5-8. Photo of the robot arm A type(Elbow joint).

### 5.3.1.3 手首関節モジュール

人の手首関節に二つの回転運動があり，この二つの回転軸は同一平面内にある．2 モーター2 自由度干渉駆動モジュールでは，2 モーター外付け機構しかこの要求を満たすことができないと考える．そのため，ロボットアーム-A タイプの手首関節は2 モーター外付け機構を採用する．

$$\begin{bmatrix} \tau_6 \\ \tau_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{66}/r_{m6} & r_{66}/r_{m7} \\ -r_{76}/r_{m6} & r_{77}/r_{m7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m6} \\ \tau_{m7} \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

図 5-9 は肘関節のルーティング図である．(式 5-9) によって，肘関節のトルク方程 (式 5-3) が書ける．肘関節の機構は，3.4 節で説明した機構と同じで，2 つのモーターと 2 本のワイヤがあり，モーターとプーリーの名前もアームの関節に従って配列されている．

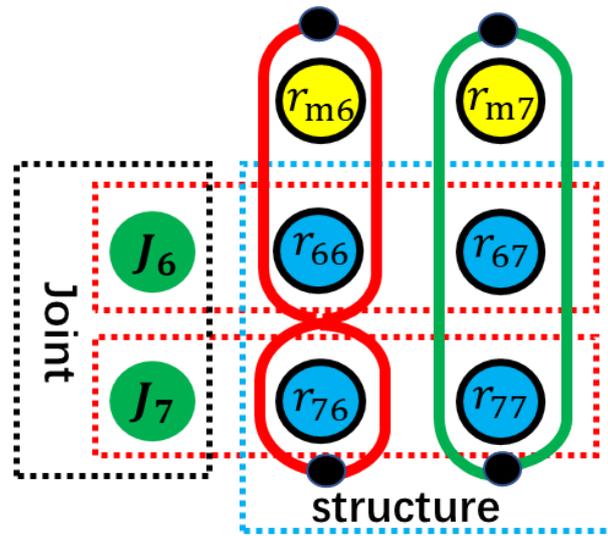


Fig. 5-9. The wire routing diagram of robot arm A type (Wrist joint).

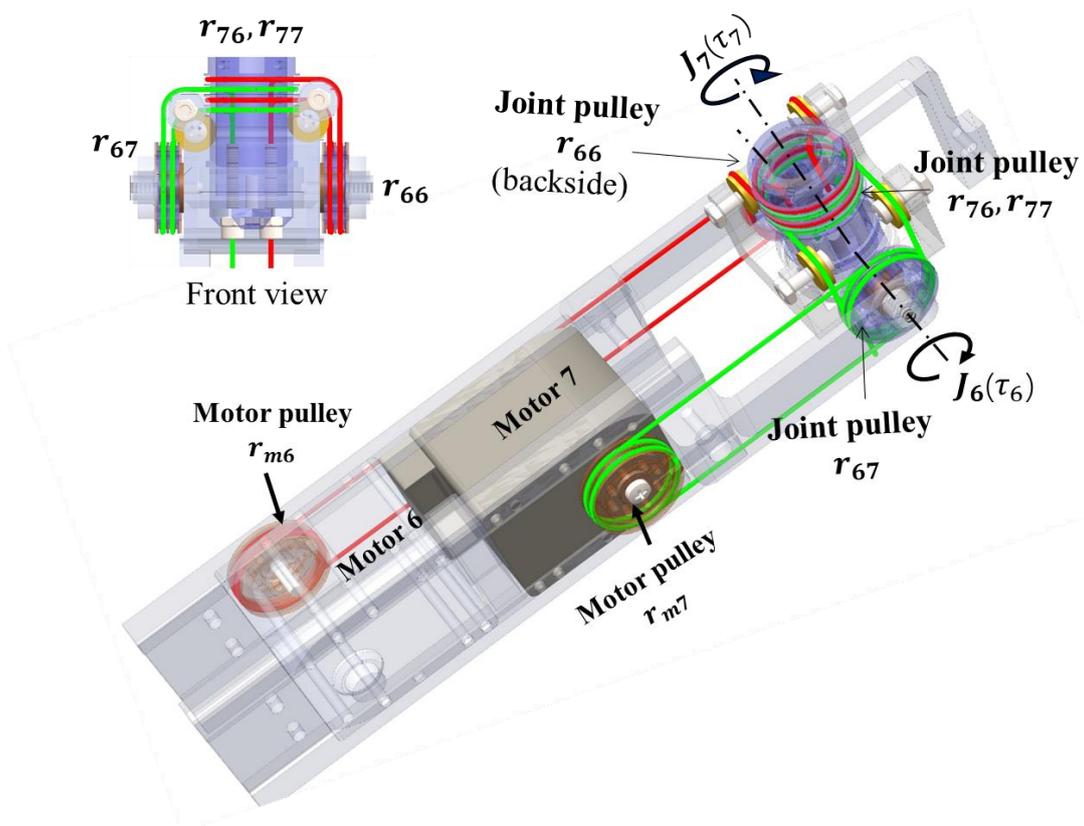


Fig. 5-10. Design drawing of the robot arm A type (Wrist joint)

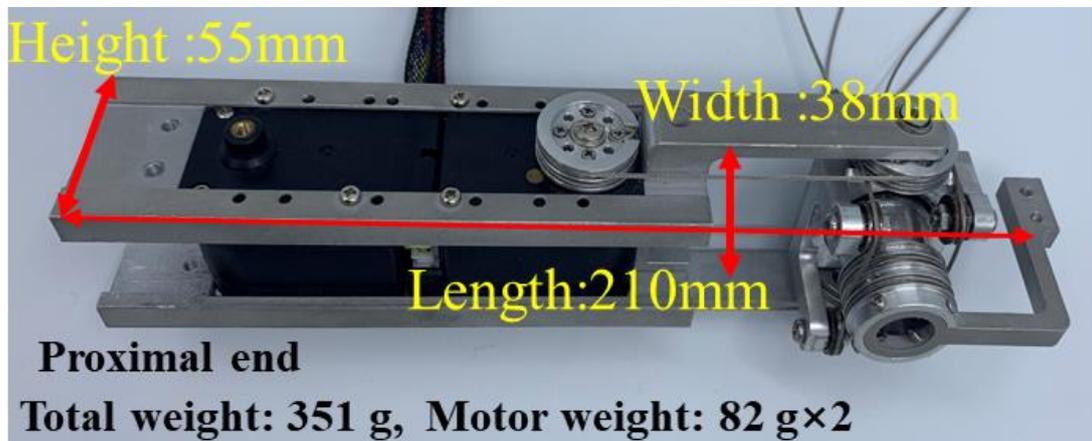


Fig. 5-11. Photo of the robot arm A type(Wrist joint).

### 5.3.2 ロボットアーム— Aタイプの全体像

図 5-12 は、ロボットアーム A タイプの全体図である。ロボットアームの各関節と関節名が図に示されている。(式 5-4) は、ロボットアームのトルク方程式である。肩関節では、関節 1 と関節 2 は両方とも 3 倍のモータートルクであり、関節 3 は 2 倍のモータートルクである。肘関節では、関節 4 と関節 5 の両方が 2 倍のモータートルクである。肩関節と肘関節は同じモーターを使用している。手首関節は別のタイプのモーターを使用しており、トルクは 2 倍のモータートルクである。モーターモデルと関節トルクについては、5.4 節のロボットアームの評価において詳しく説明する。

$$T = AT_m \quad (5-4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & r_{12}/r_{m2} & r_{13}/r_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r_{21}/r_{m1} & r_{22}/r_{m2} & -r_{23}/r_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r_{31}/r_{m1} & 0 & r_{33}/r_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{44}/r_{m4} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{54}/r_{m4} & -r_{55}/r_{m5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{66}/r_{m6} & r_{67}/r_{m7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{76}/r_{m6} & -r_{77}/r_{m7} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \tag{5-5}$$

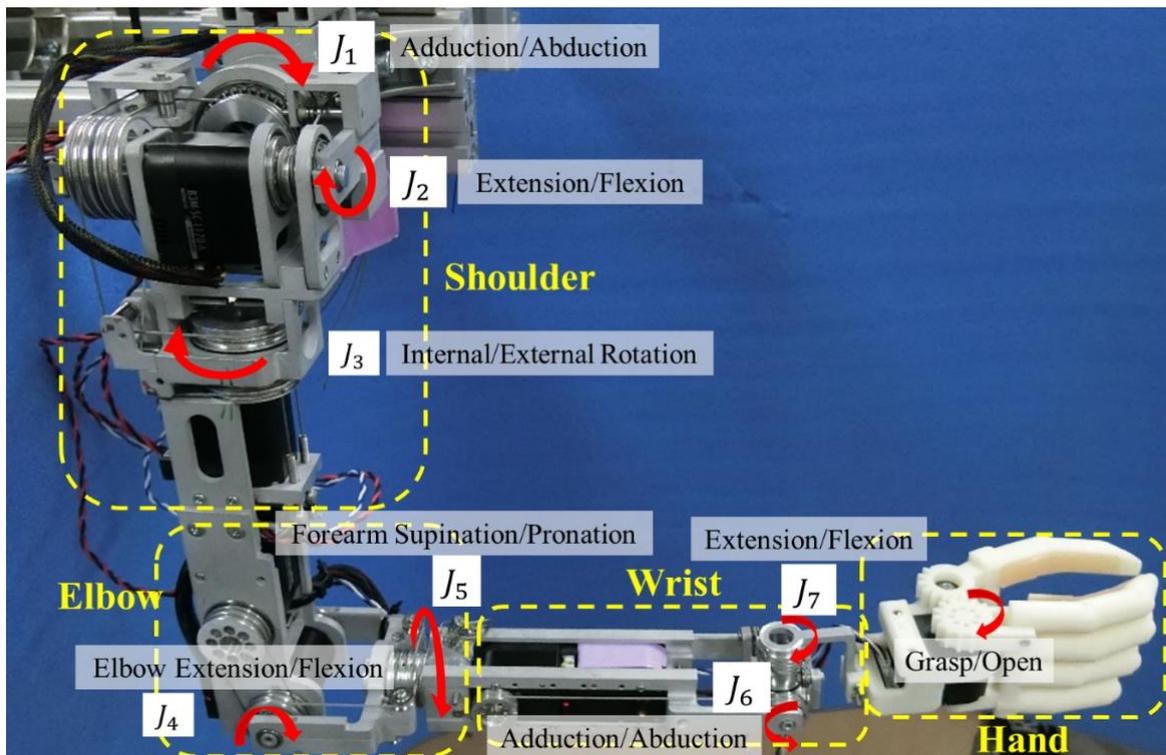


Fig. 5-12. Overall picture of robot arm A type

## 5.4 ロボットアーム— Bタイプの開発

ロボットアーム-A タイプを研究することによって、肩関節の性能が基本的にロボットアームの性能を決定していることがわかる。ロボットアーム-A タイプの肩関節が使用するワイヤのルーティング方法は **1-unrouted motor-joint form** である。この方法は、各関節を2倍のモータートルクにさせる。ロボットアームの負荷を増やすために、プーリーの半径比率を変更し、関節1と関節2は両方とも3倍のモータートルクであり、関節3は2倍のモータートルクである。関節トルクを上げたが、これは最良の結果ではない。理由は2つある。第一に、モータープーリーのサイズを1倍縮小したが、メリットが多くなかった。それは、モータープーリーが縮小された時、理論上はトルクが2倍上がる。しかし、ロボットアーム-A タイプの関節1と関節2は0.5倍のトルクしか上がらなかった。第二に、人間の腕の日常的な動作では、肩関節の伸展と屈曲の動きが大きな役割を果たす (図 5-1)。関節の他の2つの自由度は、あまり大きなトルクが要らない。

要約すると、本論文は、ロボットアーム A タイプに基づいてロボットアーム B タイプを開発し、主に次の側面を改善およびアップグレードする。

- 1, 応力がかかった関節のトルクを上げる。関節2および関節3と比較して、関節1はより多くのトルクに耐える必要がある。関節4の必要とするトルクは、関節5より大きい。

- 2, ワイヤ張力調整機構を再設計し、ロボットアームをより美しく見せ、ワイヤ張力の調整をもっと容易にする。

### 5.4.1 各関節のワイヤルーティング形式の選択

#### 5.4.1.1 肩関節モジュール

日常生活では、歩行中に自然に腕を振ったり、重い物を持ち運んだりするとき、通常、肩関節の伸展・屈曲運動が大きな役割を果たす (図 5-1)。たとえば、重いものを運ぶときは、通常、肘の関節を曲げて胸の前に物を持つ。このとき、肩関節の3つの

自由度の中、伸展と屈曲は、最も大きなトルクに耐える関節である。したがって、ロボットアーム-B タイプの肩関節は、2-unrouted motor-joint form を採用する。このルーティング方法では、1つの関節は3倍のモータートルクである(4.5節)。2-unrouted motor-joint form の干渉結果からみれば、人間の肩関節に最適である。このトルクの最大の関節をロボットアームにおける伸展・屈曲運動に用いる。次に、モーターの減速比率を2:1にした。実際の設計では、アクチュエータから関節末端までの距離をできるだけ短くすることで、関節の精度が効果的に上げることができる。また、ワイヤの交差と回転のたびに複数の滑車が必要になるため、ワイヤを機構内での交差の回数を最小限に抑える。これによって、機構の耐久性が向上され、自重の低減もできる。そのため、2-unrouted motor-joint form におけるワイヤのルーティング方向とモーターの位置を調整し、本論文の肩関節のワイヤルーティング図(図5-13)がまとめられた。

図5-13 (a) は、2-Unrouted Motor-Joint 形式のルーティング図で、(b) はロボットの肩関節の運動学である。(c) はロボットアーム-B タイプの肩関節のルーティング図であり、破線の円 $r_{23}$ は、実際の機構にない仮想の関節プーリーを表すが、この位置は、2-Unrouted Motor-Joint 形式が実現できるかどうかの肝心なところである。ロボットアームの肩関節に人間の肩関節と同じ運動学(図5-13b)を持たせ、関節1のトルクを最大にするためには、干渉と非干渉の共存を実現する必要がある。図5-13cに示すように、モーター1のワイヤは関節2を通過し、関節3に固定される。モーター2のワイヤは、関節1と関節2だけとつなげる。モーター3のワイヤが肝心で、このワイヤは関節2を通過する必要がある。最後関節3に固定される。モーター3のワイヤの長さや張力は、関節2が動く時の影響を受けられない。影響を受けると、1-Unrouted Motor-Joint 形式になり、モーター3のワイヤは関節2の回転によっても位置変化がない。これも、ワイヤ駆動機構ではよく遭う問題である。

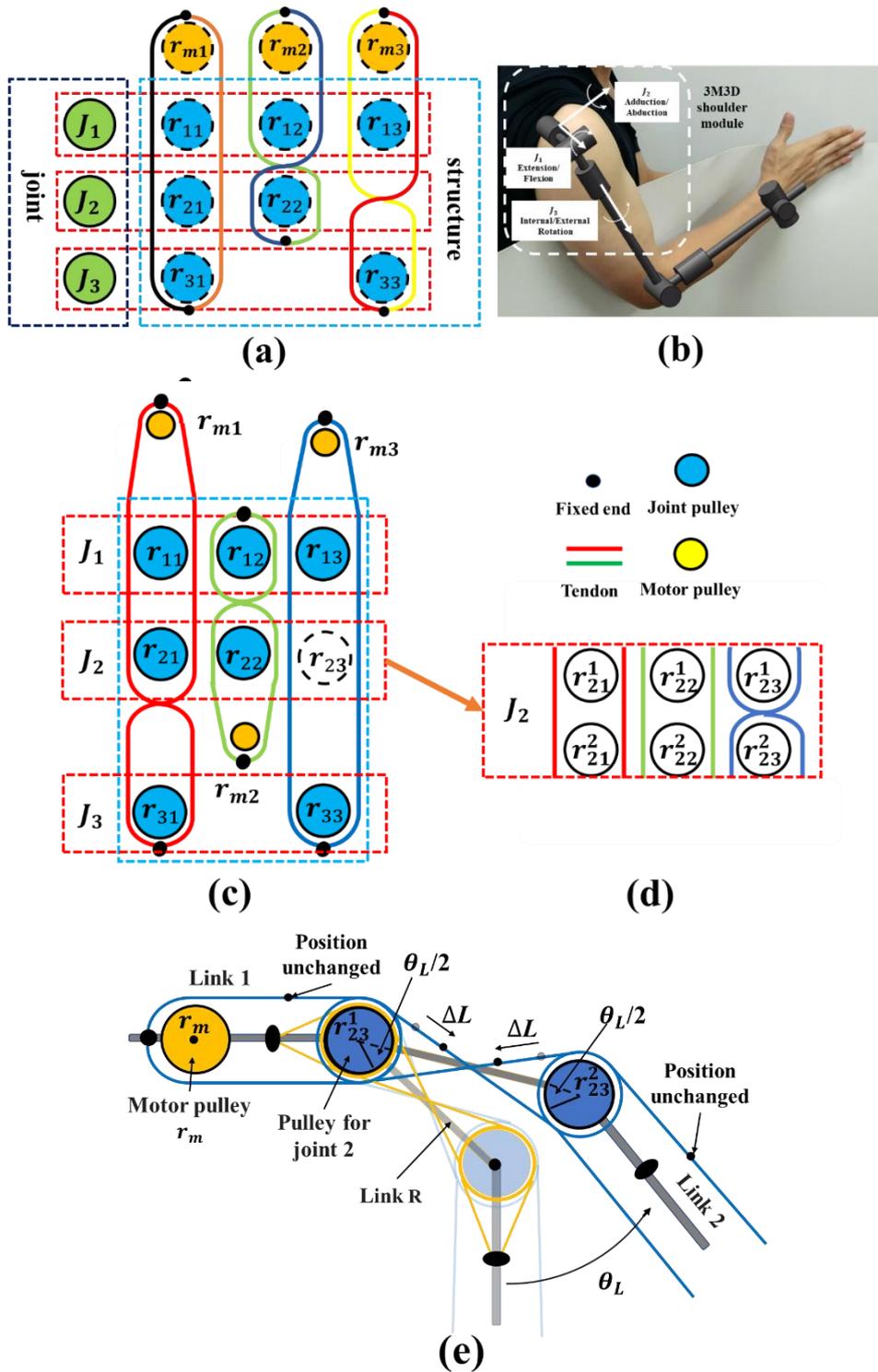


Fig. 5-13. Wire Routing. (a) 2-Unrouted Motor-Joint of Wire Routing. (b) Movement of shoulder joint (c) Tendon routing form and motor location of the humanoid shoulder. (d) Coupling and non-coupling coexist in joint 2. (e) 2-DoF rolling joint of joint 2 solves the non-coupling problem.

本論文は、干渉と非干渉の共存問題を解決するために、2自由度のローリング関節を設計した(図5-13d, e)。2つのプーリー $r_{23}^1$ と $r_{23}^2$ 、およびリンクRがこのローリング関節を組み合わせた。ローリング関節において、リンク1とリンクRの角度が、いつもリンク2とリンクRの角度と等しくなるようにするには、固定のワイヤが必要である。図5-13eに示された黄色い線は、固定のワイヤを表す。このワイヤの両端は、それぞれリンク1とリンク2に固定され、プーリー $r_2^1$ と $r_2^2$ を交差してつなげる。したがって、リンク2が $\theta_L$ で回転すると、リンクRは $\theta_L/2$ で回転する。このとき、リンクRの回転角度に対して、プーリー $r_{23}^1$ と $r_{23}^2$ の回転角度は、どちらも $\theta_L/2$ になり、これによって、2つのプーリー間のワイヤの位置変化量 $\Delta L$ は $r_2 \cdot \theta_L/2$ になる。そのため、関節が回転すると、ワイヤの長さの変化はプーリー $r_{23}^1$ と $r_{23}^2$ の間で互いに打ち消し合う。言い換えれば、関節の回転は両端のワイヤの位置に影響を与えず、ワイヤが1つの関節を通過しても、この関節と干渉しない問題が解決された。これは、関節2にもう一つの関節を増やし、ワイヤで2つの関節を1つの関節(図5-13d)に干渉するのと同じである。ワイヤが関節と干渉の必要があるとき、関節2にある2つのプーリー上のワイヤのルーティング方法は同じで、図5-13dに示された赤いワイヤと緑のワイヤと同様である。ワイヤが関節と干渉の必要がないとき、図の青いワイヤのよう、2つのプーリー間で1回交差する。

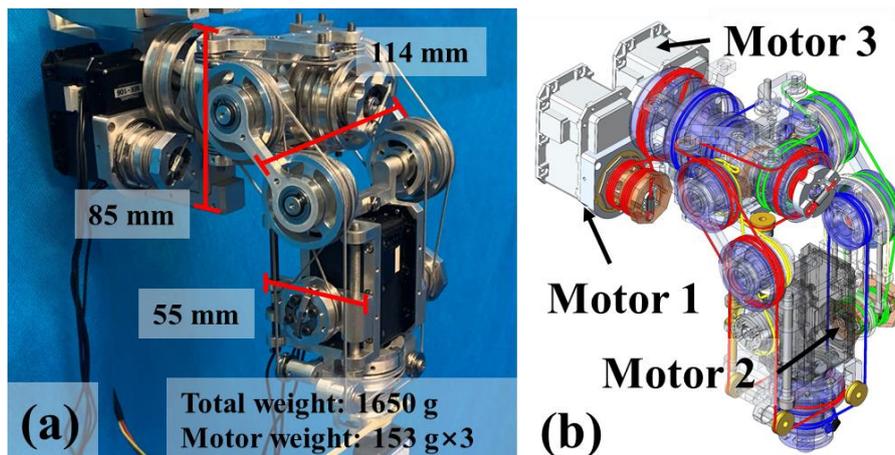
図5-13cによって、ロボットアームAタイプの肩関節トルク方程式が得られる。

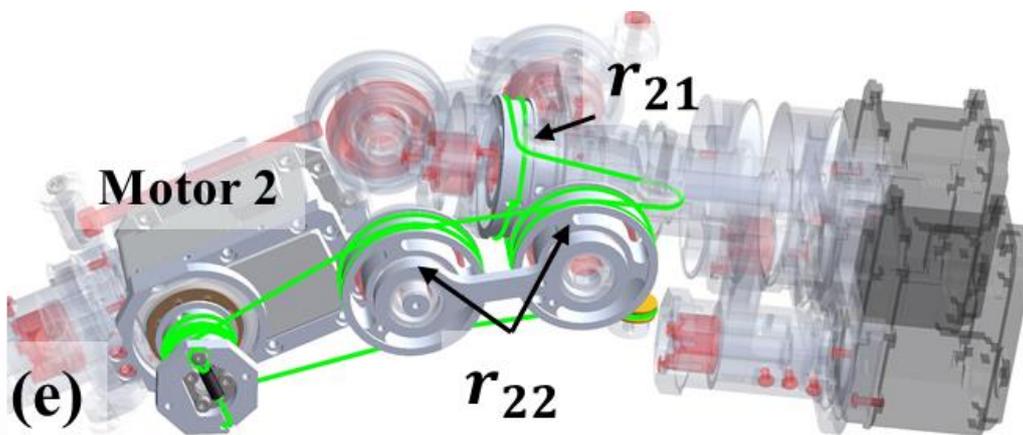
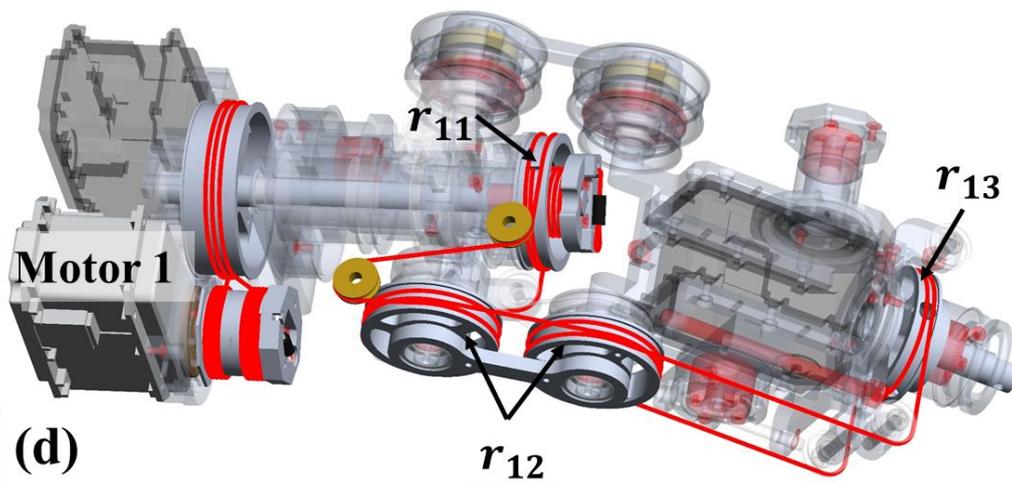
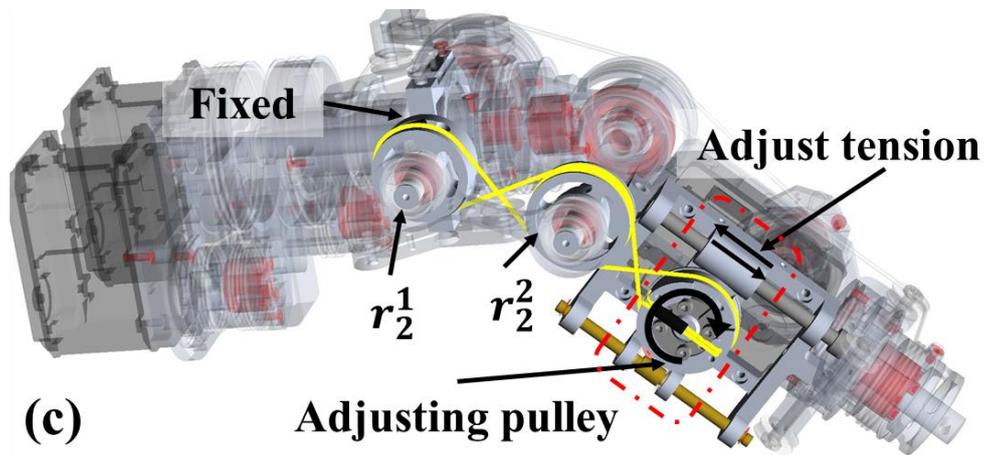
$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & -r_{12}/r_{m2} & r_{13}/r_{m3} \\ r_{21}/r_{m1} & r_{22}/r_{m2} & 0 \\ -r_{31}/r_{m1} & 0 & r_{33}/r_{m3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \\ \tau_{m3} \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

関節トルクを上げるために、モーターの減速をした。減速比は2:1で、肩関節モーター角度と関節角度の式がまとめられる。 $r_{ij}/r_{mi} = 2$ を式(5-6)に代入すると、式(5-7)が得られる。式(5-7)から、モーターの減速比は2:1で、 $\text{Max}(\tau_{m1}) = \text{Max}(\tau_{m2}) = \text{Max}(\tau_{m3}) = 2$ であることがわかる。関節1が回転する時、理論上の最大トルクは、6倍のモータートルクになる。関節2または関節3しか回転しない時、理論上の最大トルクは3倍のモータートルクになる。

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 2 \\ 2 & 2 & 0 \\ -2 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m1} \\ \tau_{m2} \\ \tau_{m3} \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

ロボットアーム-Bタイプの肩関節の写真と設計図を図5-14に示す。図5-14(a)は、肩関節の回転軸の位置とサイズを示している。図5-14(c)は、2自由度のローリング関節を固定するためのワイヤで、ワイヤ経路と固定位置を表している。関節2の初期角度を調整するため、調整プーリーを追加した。調整機構（赤い点線内部品）が上下に動き、ワイヤ張力を調整する。調整プーリーの回転は関節の初期位置を調整する。図5-14(d)はモーター1のワイヤで、2段で構成される。ワイヤはモーター1をワイヤ端とし、減速プーリーを通過した後、伝動軸によってトルクを関節プーリー $r_{11}$ に伝達し、関節2を通過した後、関節3のプーリー $r_{31}$ に固定される。図5-14(e)はモーター2のワイヤである。ワイヤはモーター2から始まり、関節2を通過し、関節プーリー $r_{12}$ に固定される。図5-14(f)はモーター3のワイヤである。ワイヤはモーター3から始まり、同心であるが半径が異なる減速プーリーを通過した後、関節プーリー $r_{13}$ から始まり、関節3のプーリー $r_{33}$ に固定される。その中で、モーター3は関節2との干渉ができないため、モーター3は関節2での2つのプーリーの間で交差する。モーター1とモーター2は関節2と干渉する必要があるため、関節2での2つのプーリーに同じようにルーティングする。関節2は、干渉と非干渉の共存を実現した。





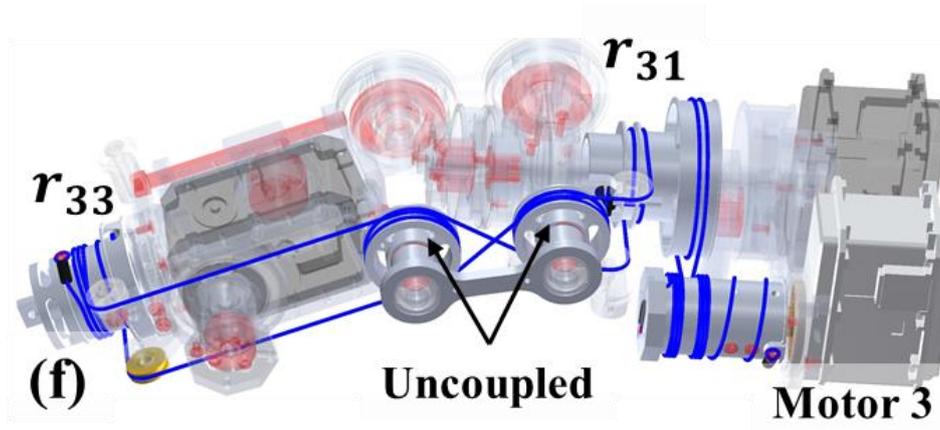


Fig. 5-14. Design and implementation of the 3M3D humanoid shoulder. (a) and (b) are photos of the shoulder joint. (c) shows the tendon routing for fixing the 2-DoF rolling joint. An adjustment pulley was added to adjust the initial angle of joint 2. (d), (e), and (f) show the routing of tendons from motor 1, motor 2, and motor 3.

#### 5.4.1.2 肘関節モジュール

肩関節のモーターを固定端に配置したため、ロボットの上腕の位置に多くのスペースが残され、ロボットアームの重心も回転軸により近くようになった。上腕は十分な位置があるため、ロボットアーム-Bタイプの肘関節は2モーター2自由度の2モーター外付け機構形式を利用し、減速率を上げるのに便利である。図 5-15 (a) はロボットの肘関節の運動学で、(b) は2モーター外付け機構形式のワイヤルーティング方法である。(c) はロボットアーム-Bタイプの肘関節のワイヤルーティング方法である。

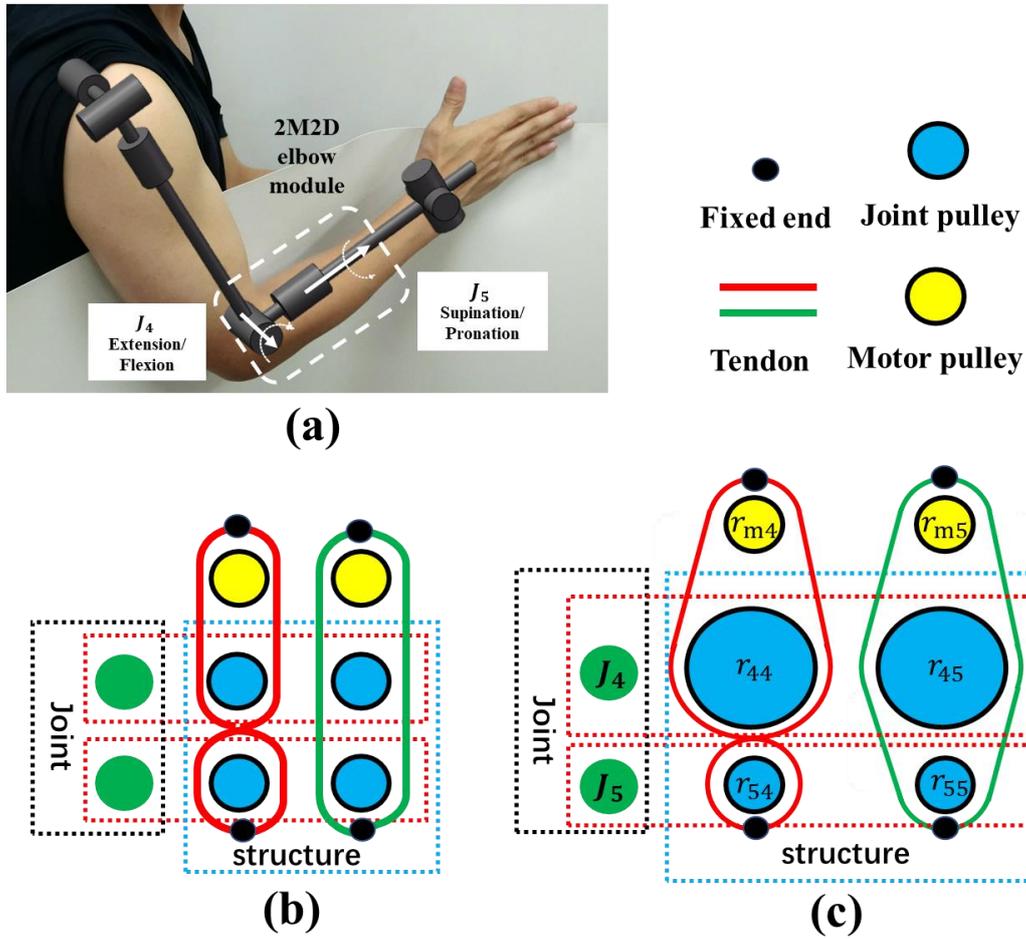


Fig. 5-15. (a) Movement of Elbow joint.(b) Externally-Actuated Structure of Wire Routing (c) The wire routing diagram of robot arm B type (Elbow joint)

図 5-15c によって、ロボットアーム-B タイプの肩関節のトルク (式 5-8) がまとめられる。

$$\begin{bmatrix} \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{44}/r_{m4} & r_{45}/r_{m5} \\ -r_{54}/r_{m4} & r_{55}/r_{m5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m4} \\ \tau_{m5} \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m4} \\ \tau_{m5} \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

腕が正常に動くと、肘関節の関節 4 (伸展/屈曲) が関節 5 より長くなり、トルクも大きくなる。そのため、関節 4 の関節プーリーに 2:1 の減速比を増やした。  $r_{ij}/r_{mi} =$

2を式 (5-8) に代入すると、式 (5-9) が得られる。式 (5-9) から、 $\text{Max}(\tau_{m4}) = \text{Max}(\tau_{m5}) = 1$  分かる。関節 4 が回転するとき、理論上の最大トルクは 4 倍のモータートルクになる。関節 5 が回転すると、理論上の最大トルクは 2 倍のモータートルクになる。

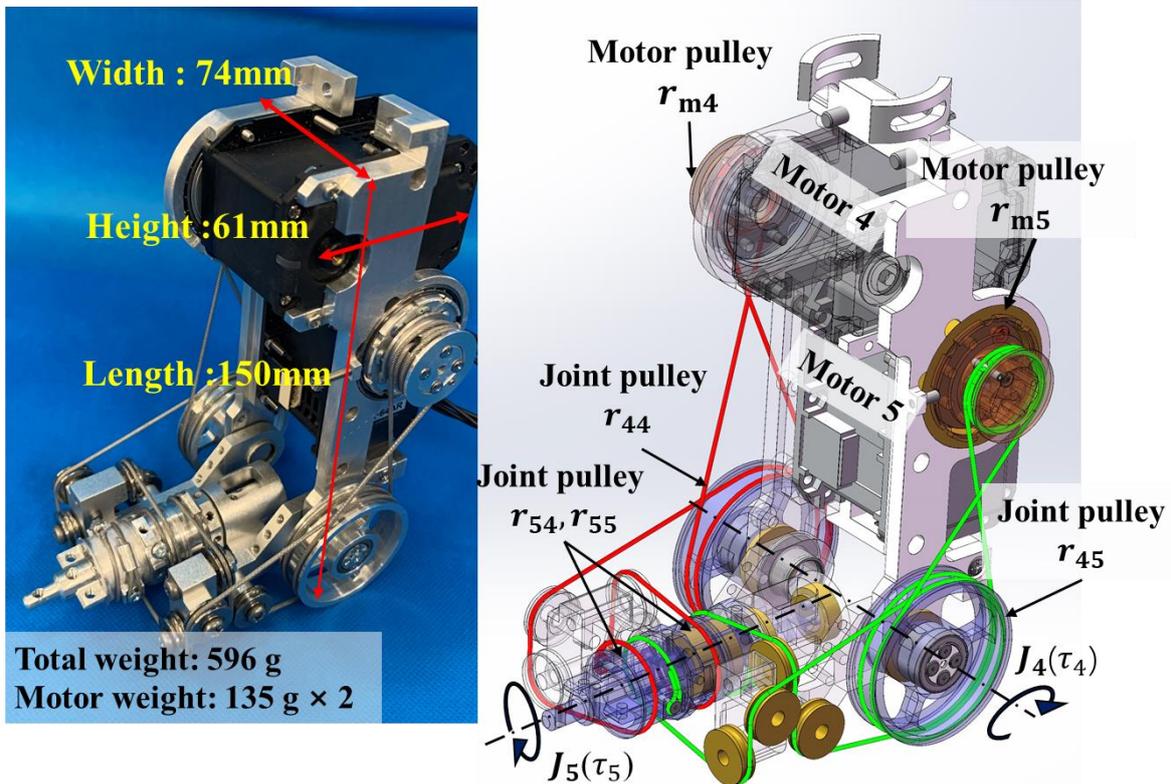


Fig. 5-16. (a) Design drawing of the robot arm B type(Elbow joint) . (b) Photo of the robot arm B type(Elbow joint) .

図 5-16 (a) は肘関節の写真で、肘関節の回転軸の位置とサイズを示している。図 5-16 (b) は肘関節の設計図である。肘関節は、2つのモーター、4つの関節プーリーと2本のワイヤで構成される。モーター4のワイヤは関節4のプーリー $r_{44}$ にルーティングし、左から関節5のプーリー $r_{54}$ にルーティングしてから関節5に固定される。モーター5のワイヤは、同じ方法で関節プーリー $r_{45}$ と $r_{55}$ にルーティングする。注意すべきなのは、2本のワイヤはそれぞれ左右から関節5のプーリーにルーティングすることである。関節5が回転すると、2つのモーターは逆方向に回転する。したがって、プーリー $r_{44}$ と $r_{54}$ において、モーター4のルーティング方向は逆で、プーリー $r_{45}$ と $r_{55}$ では、モーター5のルーティング方向は同じである。

### 5.4.1.3 手首関節モジュール

手首関節は肘関節と同じで、2 モーター2 自由度の 2 モーター外付け機構形式を使用し、減速比を上げるのに便利である。図 5-17 (a) はロボットの手首関節の運動学で、(b) は 2 モーター外付け機構形式のワイヤルーティング方法である。(c) はロボットアーム-B タイプの手首関節のワイヤルーティング方法である。

図 5-17c によって、ロボットアーム-B タイプの肩関節のトルク方程式 (5-10) がまとめられる。

$$\begin{bmatrix} \tau_6 \\ \tau_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{66}/r_{m6} & r_{66}/r_{m6} \\ r_{76}/r_{m6} & -r_{77}/r_{m7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m6} \\ \tau_{m7} \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.27 & 1.27 \\ -1.27 & 1.27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{m4} \\ \tau_{m5} \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

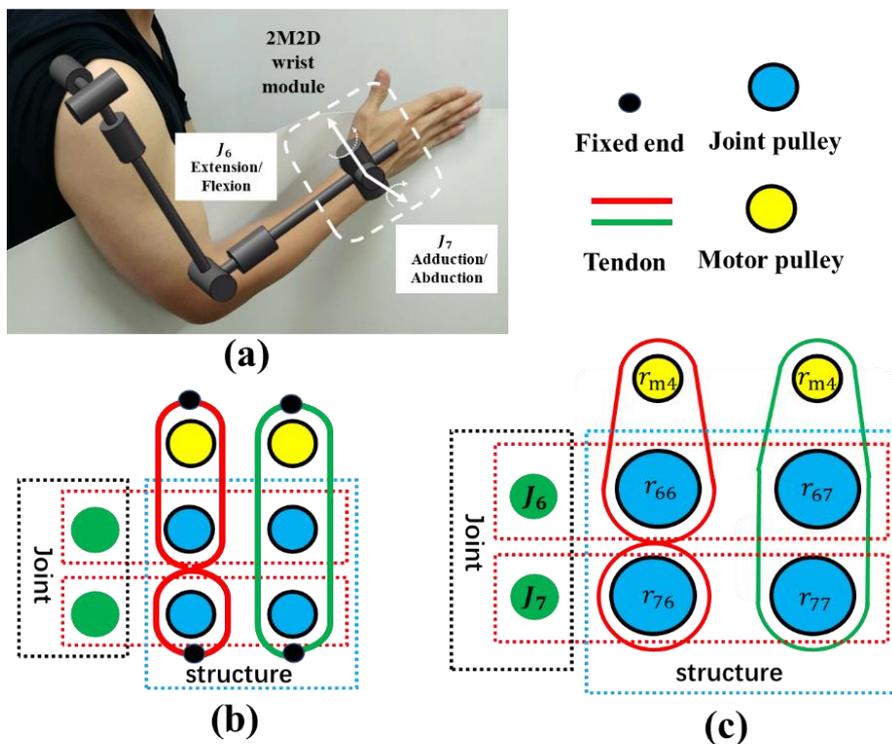


Fig. 5-17. (a) Movement of Wrist joint. (b) Externally-Actuated Structure of Wire Routing (c) The wire routing diagram of robot arm B type (Elbow joint)

手首関節に使用するモーターのトルクが小さいため、2つの関節に14:11の減速比を増やし、 $r_{ij}/r_{mi} = 1.27$ を(式5-10)に代入すると、(式5-11)が得られる。(式5-11)から、 $\text{Max}(\tau_{m6}) = \text{Max}(\tau_{m7}) = 1$ がわかる。ジ関節6と関節7がそれぞれ回転する場合、理論上の最大トルクは2.5倍のモータートルクになる。

図5-18(a)は手首関節の写真で、手首関節の回転軸の位置とサイズを示している。図5-18(b)は手首関節の設計図である。手首関節のルーティング方法は肘関節のものと同じだが、ワイヤ張力調整機構が唯一の違いである。手首関節では、ワイヤはモーターから始まり、先にワイヤ張力調整機構を通過し、次に関節6と関節7のプーリーにルーティングする。注意すべきなのは、手首関節では、関節6と関節7のピッチングモーションは同じ平面にあることである。

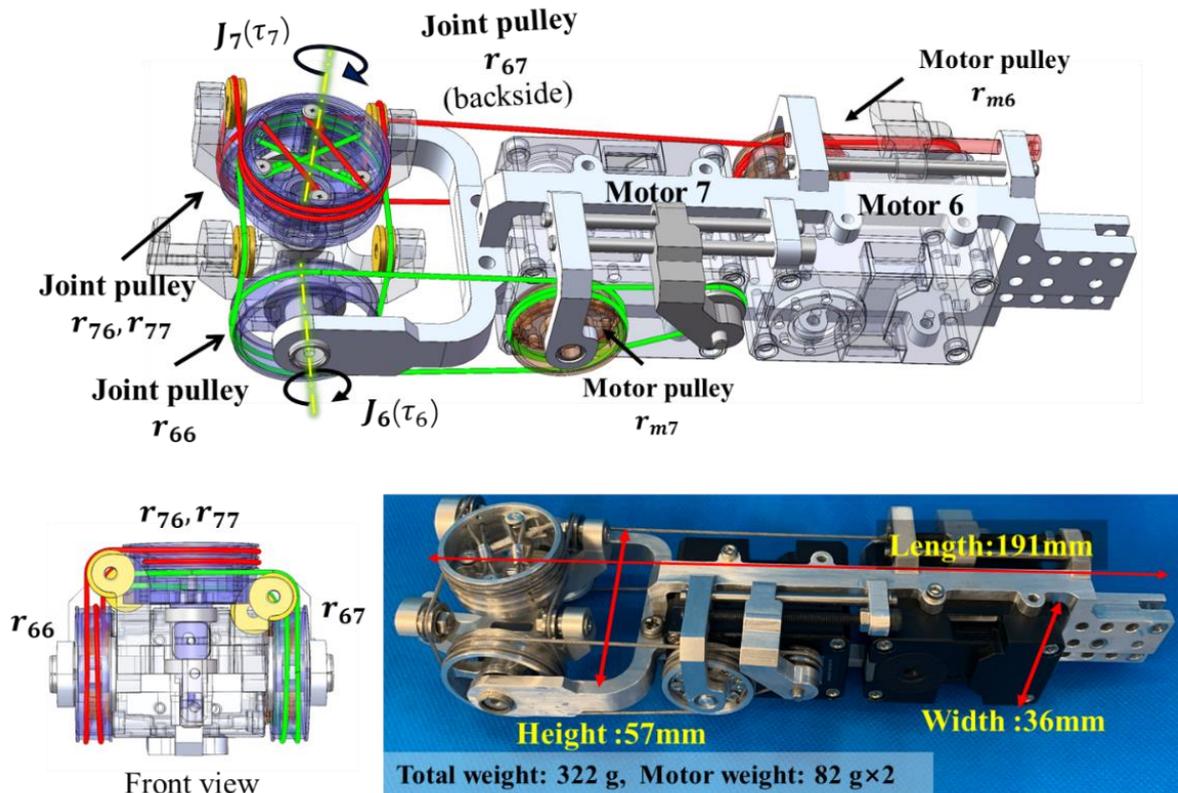


Fig. 5-18. (a) Design drawing of the robot arm B type(Wrist joint) . (b) Photo of the robot arm B type(Wrist joint) .

### 5.4.2 ロボットアーム— Bタイプの全体像

図 5-19 は、ロボットアーム-B タイプの全体図であり、ロボットアームの各関節と関節名が標識されている。(式 5-12) は、ロボットアームのトルク方程式である。肩関節、肘関節、手首関節は異なるモーターを使用した。肩関節の関節 1, 関節 2, 関節 3 のトルクは、それぞれ 6 倍, 3 倍, 3 倍のモータートルクになる。肘関節の関節 4 は 4 倍のモータートルクになり、関節 5 は 2 倍のモータートルクになる。手首にある関節 6 と関節 7 の二つの関節とも 2.5 倍のモータートルクになる。

$$T = AT_m \tag{5-12}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} r_{11}/r_{m1} & -r_{12}/r_{m2} & r_{13}/r_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r_{21}/r_{m1} & r_{22}/r_{m2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -r_{31}/r_{m1} & 0 & r_{33}/r_{m3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{44}/r_{m4} & r_{44}/r_{m4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_{54}/r_{m4} & r_{55}/r_{m5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{66}/r_{m6} & r_{67}/r_{m7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_{76}/r_{m6} & r_{77}/r_{m7} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 2 & -2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.27 & 1.27 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.27 & 1.27 \end{bmatrix} \tag{5-13}
 \end{aligned}$$

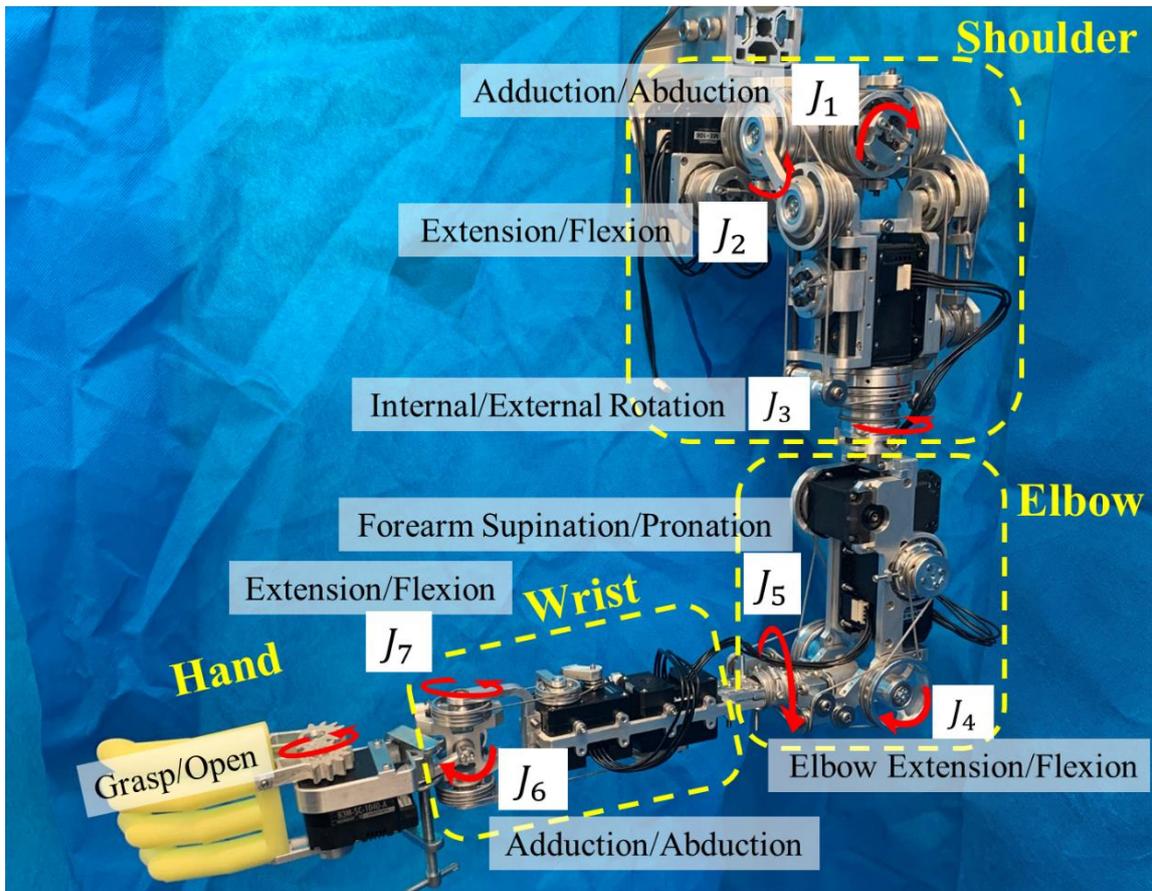


Fig. 5-19. Overall picture of robot arm B type

## 5.5 ワイヤ張力調整機構

ワイヤやクローラーベルトなどの伝動機構には、張力調整機構が必要である。このような伝動機構が設置されたり、長期間で使用されたりする場合、張力調整機構によって、初期時にある機構の浮遊運動を解決し、機構の伝達効率と精度を上げる必要がある。張力調整機構は、いつでも張力を調整できる特性を備えなければならない。柔軟素材は作業中に、疲労により、伝動を遅らせ、精度に影響を与えてしまうためである。(式 2.9)から角度の誤差は主にワイヤの弾性変形に由来するが、ワイヤ張力調整機構はワイヤの予荷重力の問題を解決し、ワイヤの弾性変形による誤差を低減することを期待できる。

本論文では、異なる環境に適応する3種の張力調整機構の開発を実現した。

### 5.5.1 中空ねじ式

図 5-20 は、中空ねじをワイヤ張力調整機構とした時の原理図で、原理は複雑ではない。ワイヤの一端をモータープーリーに固定し、次にすべての関節プーリーにルーティングした後、最後の関節プーリーのリンクに固定する。最後の関節プーリーのリンクに、1つの中空ねじを置き、図のようにワイヤをねじに固定する。ねじを回転させると、ワイヤが引き抜かれ、これによって機構でのワイヤの予荷重力が調整される。

この機構の利点は、機構と実装の簡単さや、耐久性が高さにある。欠点も2つある。1つは、調整できる仮締め力の範囲が広くない。調整範囲がねじの長さを超えると、ワイヤを再固定して再度調整する必要がある。もう1つは、広いスペースが必要である。中空ねじの機構がシンプルだが、最後の関節に固定する必要がある。関節が回転すると、張力調整機構が手首などの関節の通常の回転に影響を与える可能性がある。手首関節のサイズは大きくないが、ワイヤ調整機構を加えると大きくなる。図 5-20 は、ロボットアーム-A タイプにおける各関節の張力調整機構の位置と拡大図である。

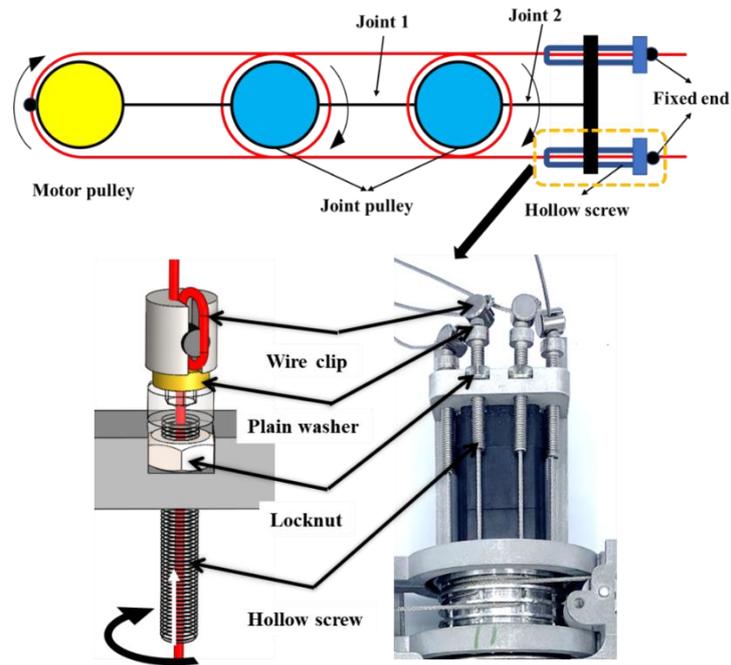


Fig. 5-20. Schematic diagram of tendon tension adjustment Structure (Hollow screw).

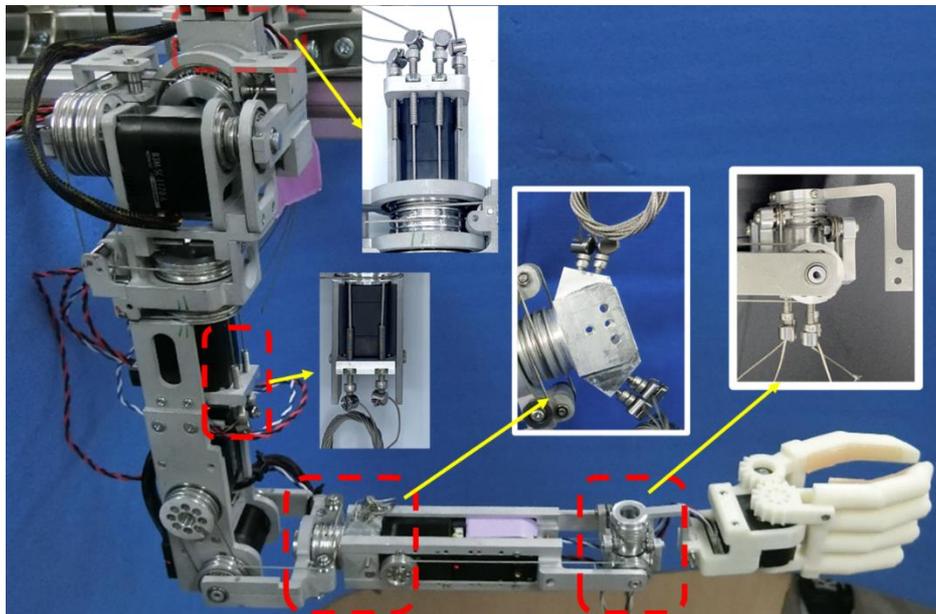


Fig. 5-21. Photo of Tendon Tension Adjustment Structure(Hollow screw)

### 5.5.2 メカロックまたワンウェイクラッチ式

図 5-22 は、メカロックまたワンウェイクラッチをワイヤ張力調整機構とした時の原理図である。この調整機構は、モータープーリー、または最後の関節の関節プーリーを2つのプーリーに分割し、2つのプーリーを独立に回転または固定させる。ワイヤの張力を調整する必要がある場合、2つのプーリーを相互に回転させ、調整が完了した後、メカロックまたはねじでこの2つのプーリーを一緒に固定する。

図 5-22 は、モータープーリーが A と B の2つのプーリーに分割された様子を示している。モータープーリー B は、メカロックでモータープーリー A と繋ぐ。2つのプーリーが図のように動くと、機構内のワイヤは引き締められる予荷重力が要件を満たしている場合、2つのプーリーはメカロックによって一緒に固定される。

この張力調整機構の利点は次のとおりである。1, 調整機構は関節の回転に影響を与えない。2, 2つのプーリー A と B は相互に何度も回転できるため、調整できる範囲が広い。しかし、欠点も2つある。1, ワイヤ張力調整機構が配置されているプーリーは、回転軸の方向に従う長さが長くなる。図に示すように、モータープーリーはとても長い。2, 他の補助工具を設計する必要がある。ワイヤの張力を調整する場合、モータープーリー B を回転させる工具と、モータープーリー A を固定する工具が必要である。

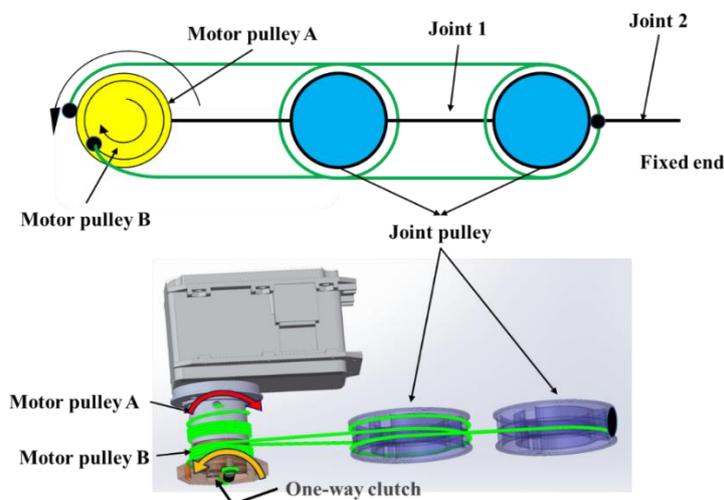


Fig. 5-22. Schematic diagram of tendon tension adjustment Structure (One-way clutch).

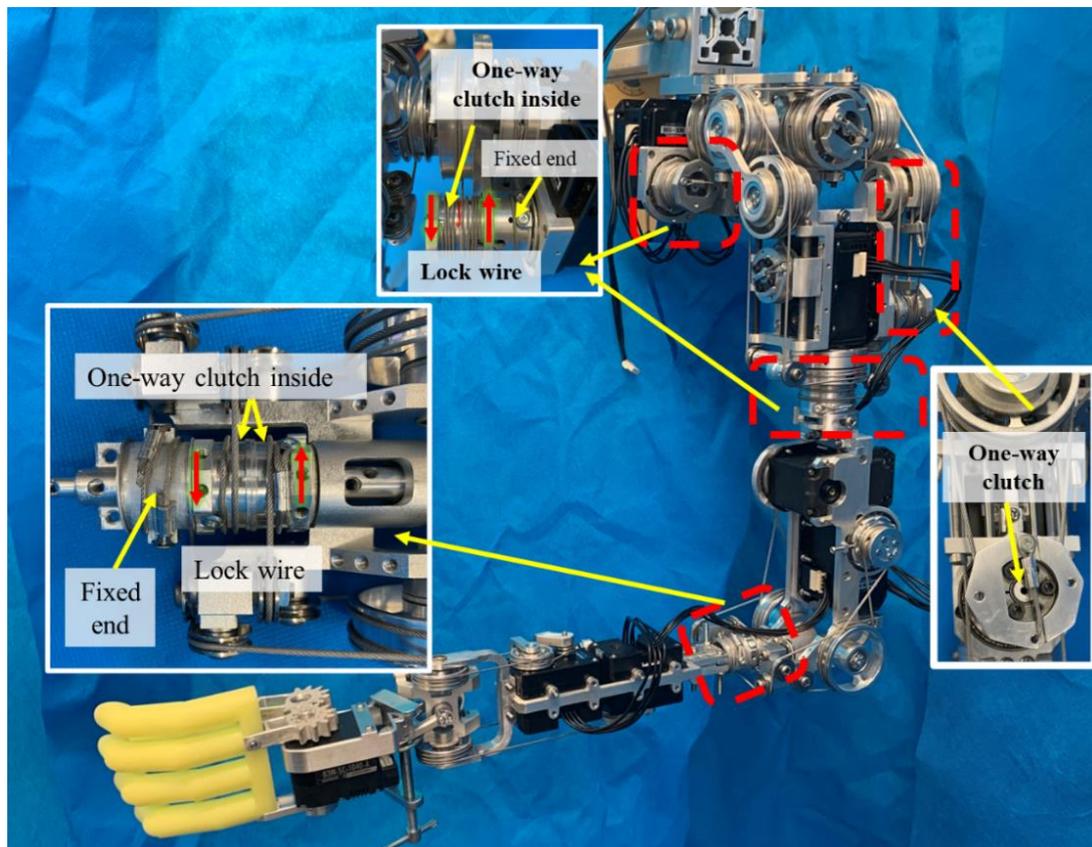


Fig. 5-23. Photo of Tendon Tension Adjustment Structure(One-way clutch).

### 5.5.3 プーリー式

図 5-24 は、プーリー式ワイヤ張力調整機構の原理図と写真である。ワイヤの両端をモータープーリーと関節プーリーにそれぞれ固定し、中央の任意の位置に可動プーリーを追加してワイヤの張力を調整する。図に示すように、緑色の調整プーリーが左右に動くことで、ワイヤの張力が調整できる。

この調整機構の利点は次のとおりである。第一に、回転部品のサイズを小さくすることができる。中空ねじ式とメカロックまたワンウェイクラッチ式と比較して、プーリー式の関節プーリーとモータープーリーでは、可動部品がないため、プーリーのサイズが小さくなる。第二に、調整範囲が広い。プーリー式の欠点は以下である。第一

に、ワイヤは適当な長さが求められるため、ワイヤの長さを先に計算する必要がある。第二に、余分なスペースが必要である。

総合的に考えて、手首関節はプーリー式を採用する。これは、中空ねじ式とメカロックまたワンウェイクラッチ式は、手首関節の幅と高さを増加してしまうからである。モータープーリーと関節プーリーの間の距離が十分に大きいため、手首関節のワイヤ調整機構の使用にプーリー式が最適である。

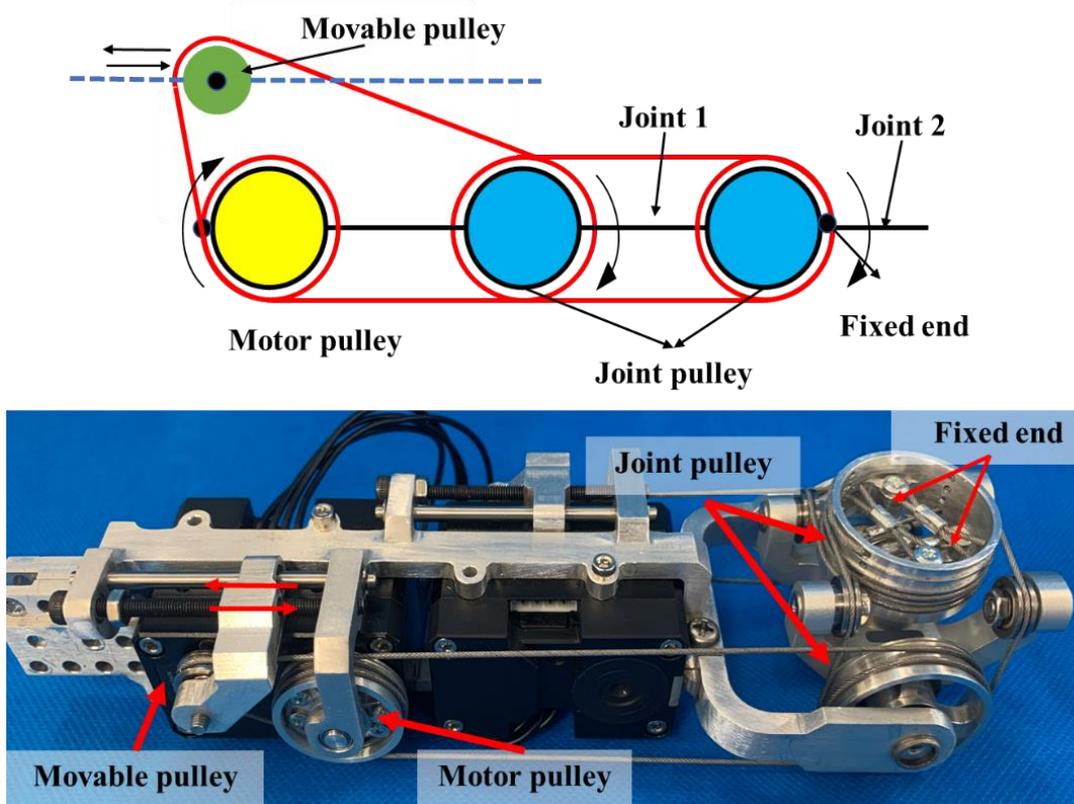


Fig. 5-24. Principles and photos of the structure of tendon tension adjustment.

## 5.6 干渉と非干渉の共存

干渉と非干渉の問題は、ワイヤ駆動におけるいつもの重要な問題である。ワイヤ駆動である限り、ワイヤは関節との干渉の必要があるかどうかの問題がある。医療機器などの関節トルクにあまり高い要求が求められない製品に対して、干渉と非干渉は特別な意味をしないが、関節に高負荷がかかる必要のあるロボットや大型設備に対しては、干渉と非干渉の問題は関節トルクとモータートルクの分配に直接影響を与えるため、とても重要である。こういった問題を無視すれば、個別のモーターに大きすぎる負荷をかかせたり、関節トルクを要件に満たされなかったりすることが出てしまうため、干渉と非干渉の問題の解決が重要である。

図 5-25 (a) は、モーターと関節 2 の干渉の関係を示している。モータートルクはワイヤで各関節の関節プーリーに伝達される。図 5-25 (b) に示されるように、モーターは関節 2 と干渉しない。関節 2 が回転する場合、関節 1 と関節 3 を接続するワイヤの張力は影響を受けてはいけけない。しかし、図に示されているように、それが明らかに不可能である。したがって、この問題を改善するための特別な機構が必要である。本論文は、3 つの解決策を提案する。

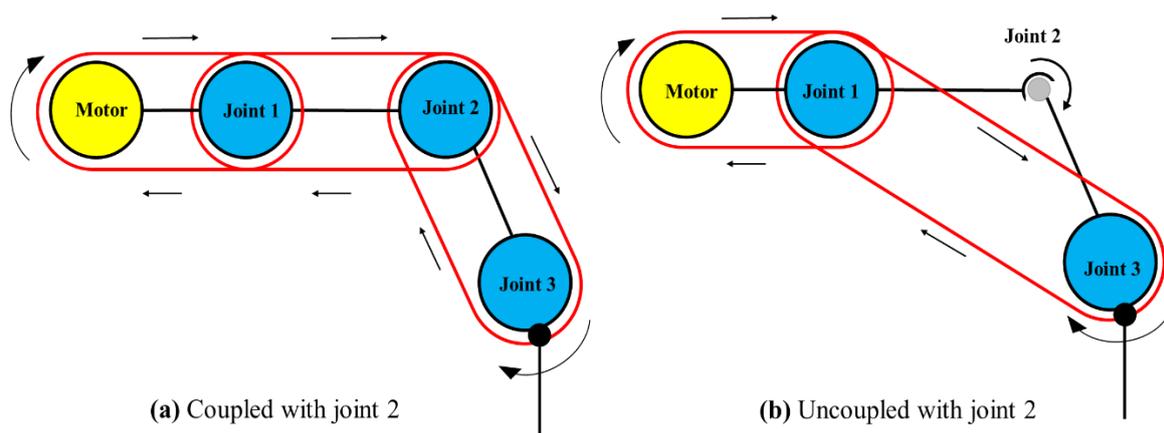


Fig. 5-25. Coupled and Uncoupled schematic diagram

## 5.6.1 ユニバーサルジョイント式

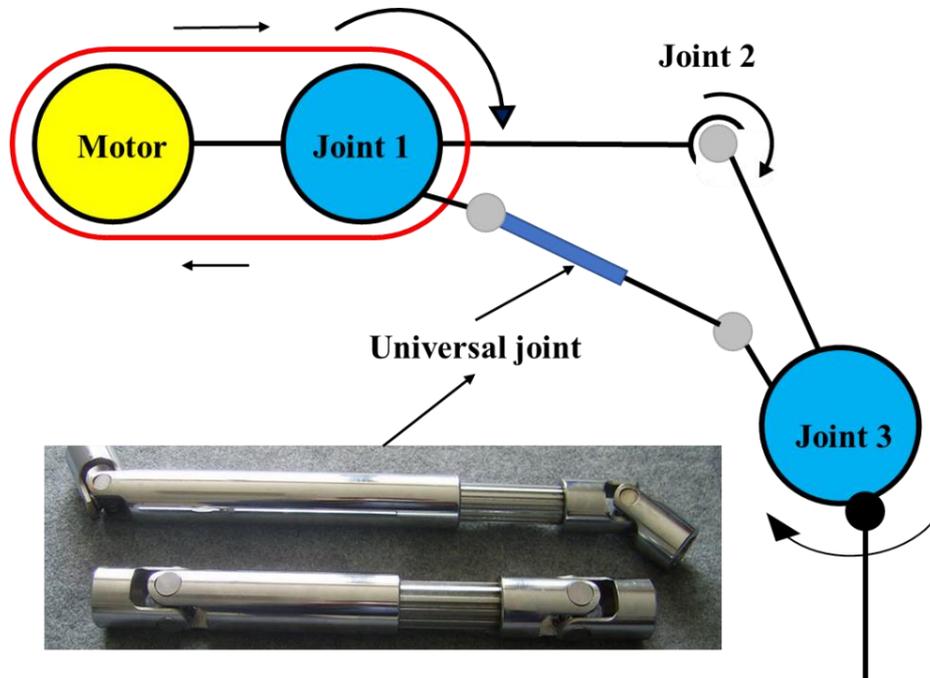


Fig. 5-26. Use universal joints to enable uncoupling

図 5-26 は、ユニバーサルジョイントで関節の非干渉の問題を解決するのを示している。ワイヤはモータープーリーから始まり、関節 1 のプーリーにルーティングし、次に、関節 1 のプーリーは、伸縮式ユニバーサルジョイントで関節 3 のプーリーにトルクを伝達する。このように、関節 2 が動くと、関節 2 の角度はワイヤの変化に影響を与えなくなる。つまり、ワイヤは関節 2 と干渉しなくなる。しかし、これも 1 つの欠点がある。伸縮式ユニバーサルジョイントには伝動角度の制限がある。伝動効率は  $0^\circ$  から  $30^\circ$  の間で最も高い。  $30^\circ$  以降はエネルギー損失が大きく、伸縮式ユニバーサルジョイント自体がトルクを伝達するとともに、長さが増加し、抵抗が大きくなる。そのため、伸縮式ユニバーサルジョイントの機構は、動きの範囲が狭い関節やトルクも小さい関節に適し、大角度の動きが必要な関節には適しない。

## 5.6.2 可動アイドラプーリー式

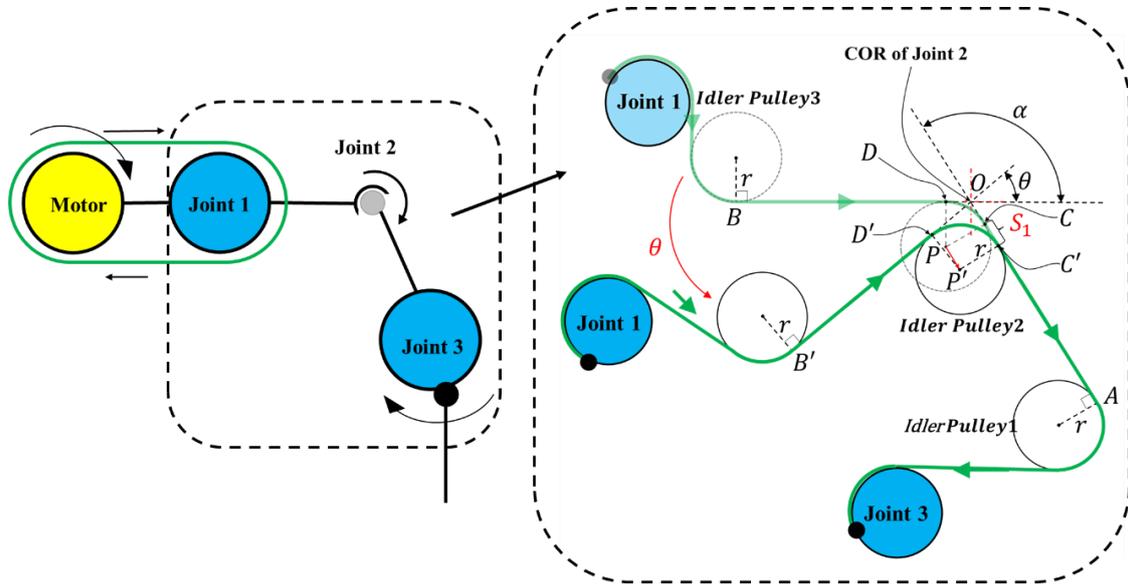


Fig. 5-27. Schematic diagram of decoupling mechanism

本論文は、可動アイドラプーリーを設計し、滑車の動きでワイヤの位置の変化を解決する。関節2が回転すると、関節1と関節3の間のワイヤは、アイドラプーリーの動きによって一定の張力を維持する。関節1と関節3を接続するワイヤが常に関節2の回転中心(COR)を通過するとすると、関節2は回転トルクを生成しなくなる。そのため、関節2が回転する場合は、上記の条件を満たすようにアイドラプーリー2の位置を変更しなければならない。図5-27に示すように、位置差 $S_1$ と回転角 $\theta$ の関係は(アイドラプーリー半径は $r$ で、初期位置： $\angle AOB = \alpha$ )：

$$S_1 = \overline{OC'} - \overline{OC} = \frac{r}{\tan\left(\frac{\alpha - \theta}{2}\right)} - \frac{r}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (5-14)$$

アイドラプーリー2の位置の変化は、ワイヤが常に関節2のCORを通過することを保証した。しかし、アイドラプーリー2の位置の変化により、アイドラプーリー1とアイドラプーリー3の間のワイヤの経路の長さが増減され、関節2の回転中に関節1と関節3も回転するようになる。そこで、ワイヤ経路の長さ $S_2$ の変化と回転角 $\theta$ の関係を計算し、次の結果になった。

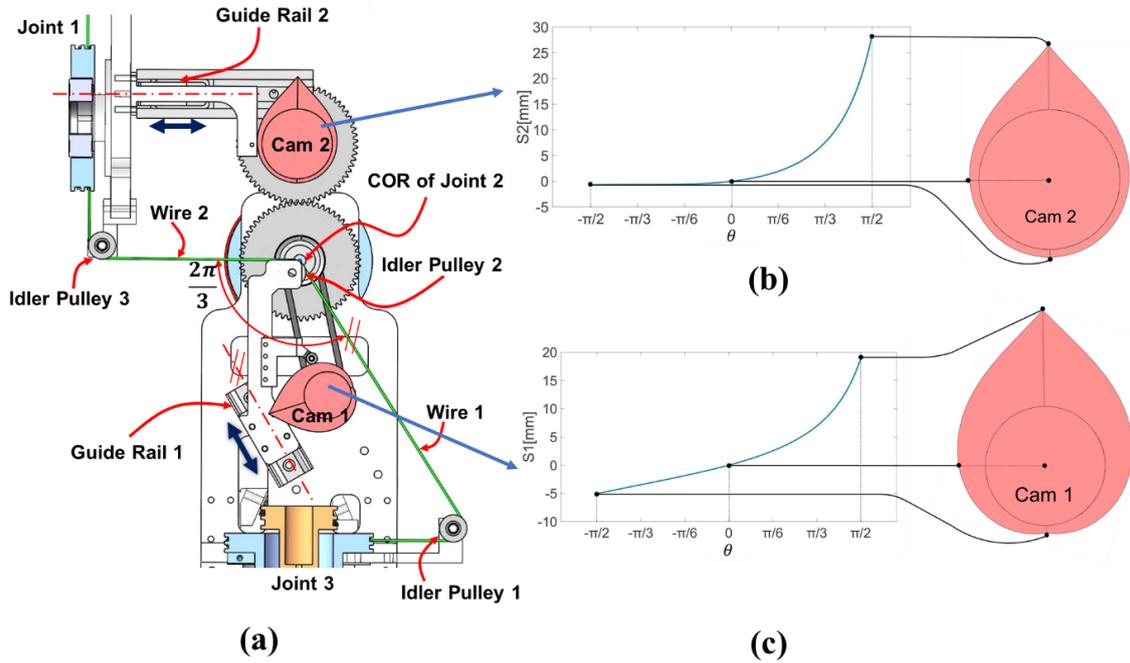


Fig. 5-28. (a) Wire adjustment mechanism. (b) Profile and structure design of cam 2. (c) Profile and structure design of cam 1.

$$\begin{aligned}
 S_2 &= \overline{AB'} - \overline{AB} = (\overline{OA} + \overline{OB} - \overline{OC} - \overline{OD} + \overline{CD}) - (\overline{OA} + \overline{OB'} - \overline{OC'} - \overline{OD'} + \overline{C'D'}) \\
 &= \frac{2r}{\tan(\frac{\alpha}{2})} - \frac{2r}{\tan(\frac{\alpha-\theta}{2})} + \theta r \quad (5-15)
 \end{aligned}$$

カムを用いる調整機構を開発した。図 5-28 に示すように、2つのカムが設計されており、カム 1 の機能はアイドラーパーリー 2 の位置を変化することである。ガイドレール 1 の移動方向はワイヤ 1 と平行であり、ワイヤ 1 が常に関節 2 の COR を通過することが保証できる。カム 2 の機能は、アイドラーパーリー 1 とアイドラーパーリー 3 の間のワイヤの長さを補正することである。カム 2 と関節 2 が一緒に回転し、アイドラーパーリー 3 がガイドレール 2 に沿う運動を駆動することで、長さの補正を実現する。

式 (式 5-14) と (式 5-15) をもとに、まずカムプロファイルを設計した。関節 2 の回転角度の  $-90^\circ$  から  $90^\circ$  までの部分は、関節 2 の回転角度の最大範囲を完全に満たしているため、この部分のみ考慮した。カムプロファイルによって、2つのカムの機構

設計をそれぞれ完了した. カムの具体的な機構は図 5-28b と図 5-28c に示されている. 結果から, 干渉と非干渉の共存が実現できるが, 機構の複雑さが問題である.

### 5.6.3 2-DoF ローリングジョイント

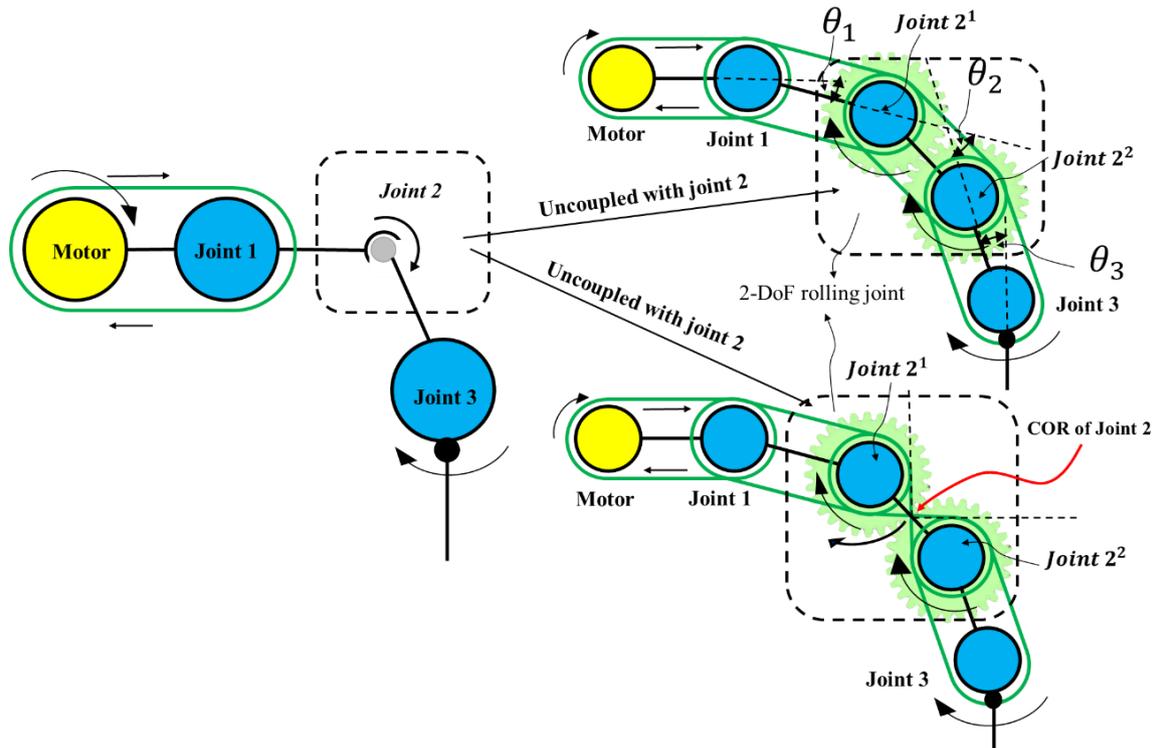


Fig. 5-29. Schematic diagram of coupling and non-coupling realized by 2-DOF rolling joint

図 5-29 は, 本論文の干渉と非干渉の共存の方法を示している. 関節 2 を,  $Joint\ 2^1$  と  $Joint\ 2^2$  の 2 つの関節に分解する. この 2 つの関節はワイヤの固定によって互いに干渉し, 2-DOF ローリング関節になる. この関節はギア伝動に似ていて, 赤いワイヤは, モーターが関節と干渉する必要があるときのワイヤルーティング方法を示し, 緑のワイヤは干渉する必要がないときのワイヤルーティング方法を示している. モーターは関節と干渉する必要がない場合, ワイヤは関節 2 にある 2 つのプーリーの間で交差し, 実際には可動 COR を構成するようになった. この COR は,  $Joint\ 2^1$  プーリーを中心に回転し, 回転角度の 2 倍は関節 2 の実際の角度である. 5.3.3.1 の図 5-13e は, この部分について詳細に説明している.

## 5.7 ロボットアームの評価実験

### 5.7.1 ロボットアームの制御システム

腕と手を並列制御する3つの関節モジュール(図 5-30)を開発した。PC にインストールされている Ubuntu Linux のロボットオペレーティングシステムは、アプリケーション層を制御するために使用される。ARM Cortex-M 7 付きマイクロコントローラ STM32 ボードは、モーターの PID 制御に使用される。ジョイントモジュールと STM32 コントロールボードとの間の並列通信は FPGA(フィールドプログラマブルゲートアレイ)によって実現される。パラレル制御アーキテクチャは、3つのジョイントモジュールを同時に制御し、より多くのジョイントに拡張することができる。ロボットアームの評価実験の制御は、いずれも上記の内容に基づいて実現された。

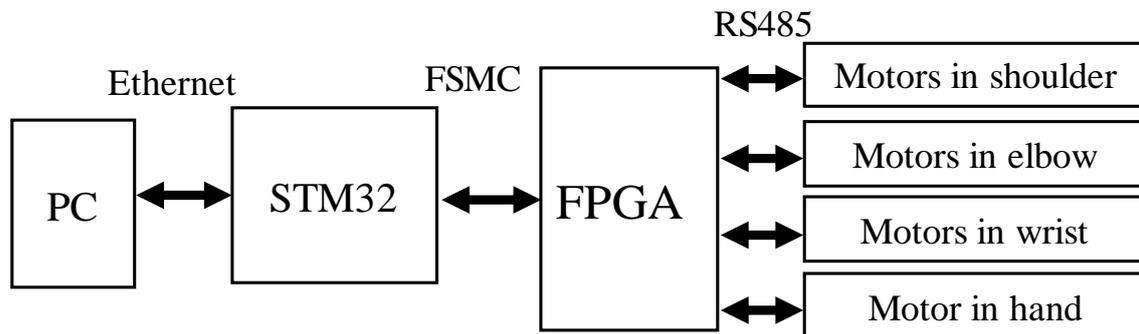


Fig 5-30. Architecture of the control system

### 5.7.2 角度及び消費電流の検証実験

5.3 節では2種類のロボットアームの機構設計について紹介し、それぞれのトルク(式 5-4)と(式 5-12)を示した。トルク方程式によってモーター角度と関節角度の関係を導き出すことができた。本節では、主にロボットアームのトルク方程式と角度の関係を検証する。

角度：ロボットアームの各関節を一定の角度で回転させ、モーターのフィードバック位置と関節の位置を比較し、モーターと関節の角度が角度方程式を満たすことを検証する。

トルク：関節の動的トルクを直接求めることは簡単ではないため、間接的な方法でモータートルクと関節トルクがトルク方程式を満たすことを検証する。ここでは、同じ条件の下で各関節におけるモーターの消費電流とモーターで直接駆動する時の消費電流を比較するという方法を用い、これによってトルク方程式の正確性を検証する。

### 5.7.3 ロボットアーム- Aタイプの検証実験

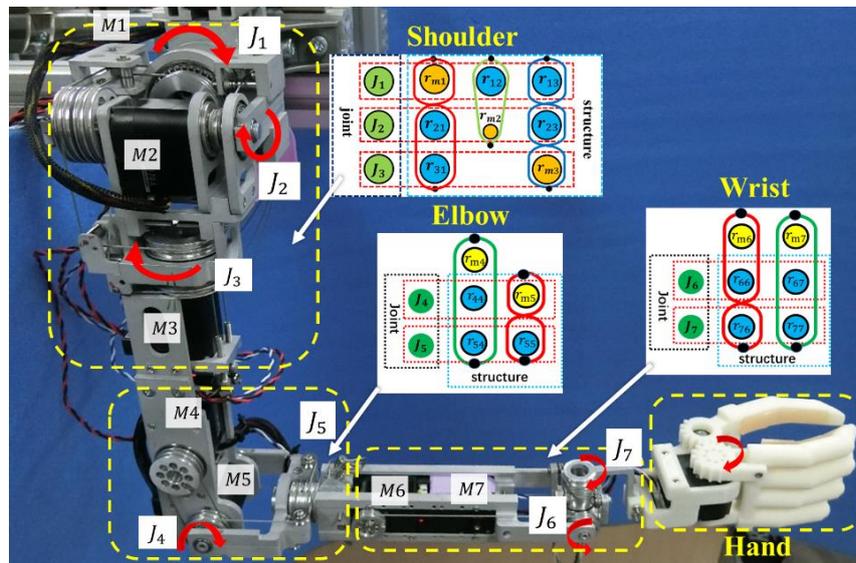


Fig. 5-31. Wire routing of robot arm A type

この図なら「図 5-31 ロボットアーム A タイプのワイヤルーティング」、ロボットアーム-A タイプのモーター番号と位置、各関節のワイヤルーティング方法、関節の番号および位置が示されている。図 5-31 に示された関節をそれぞれ回転させ、下記の角度実験と消費電流実験の結果を得た。

### 5.7.3.1 角度の検証実験

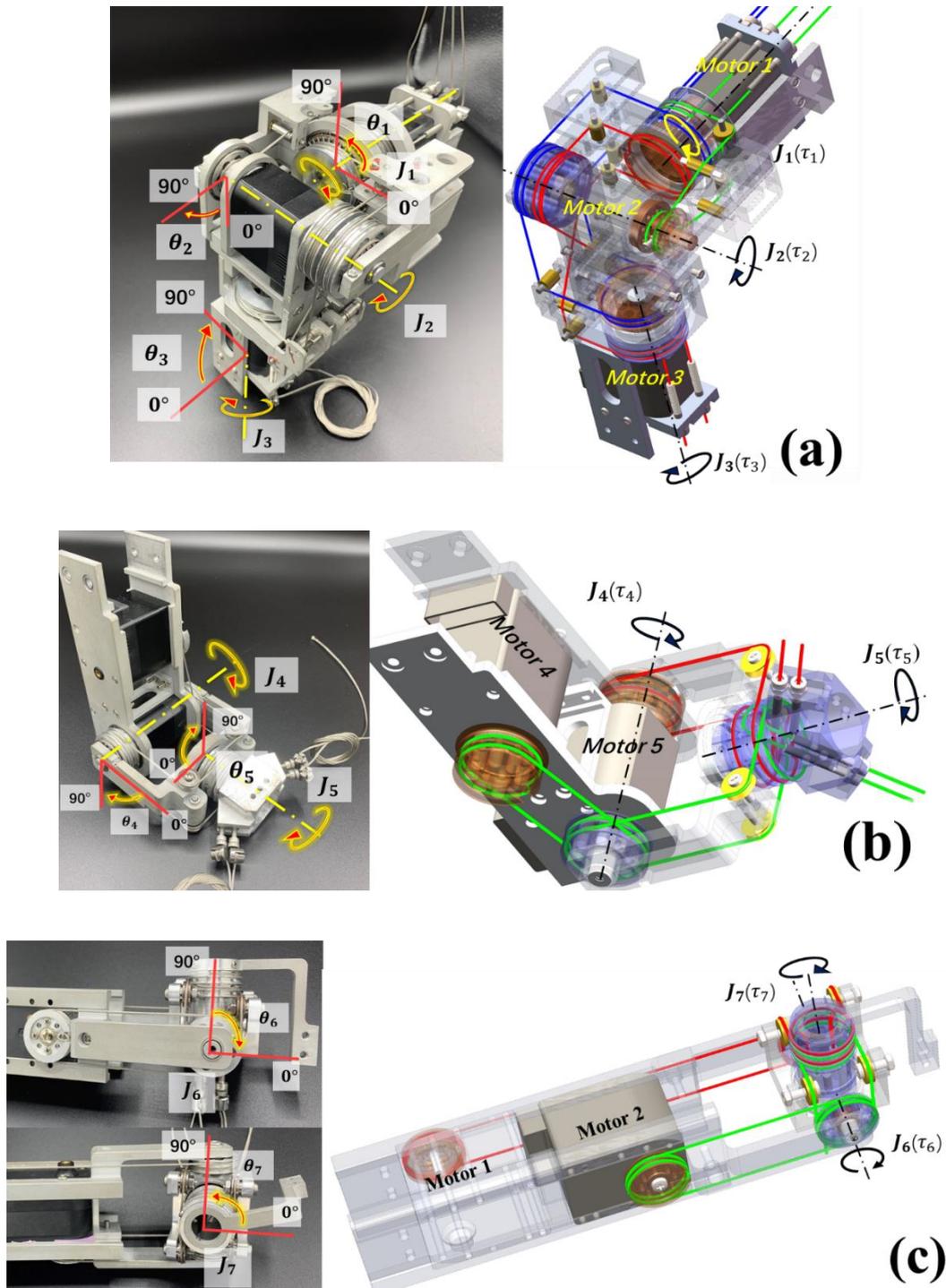
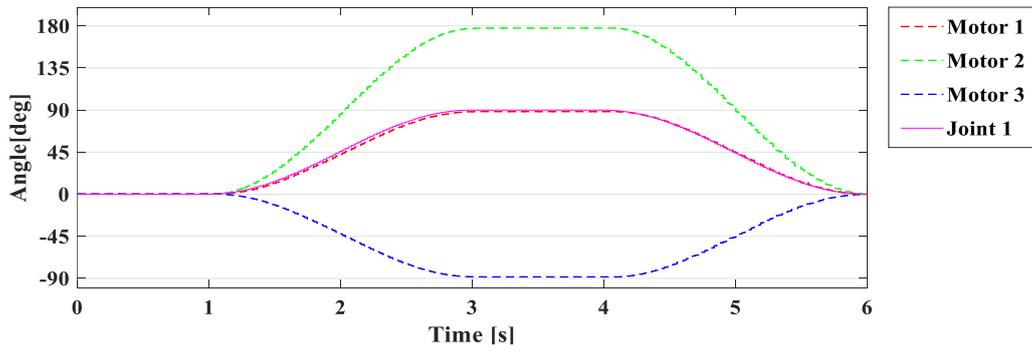
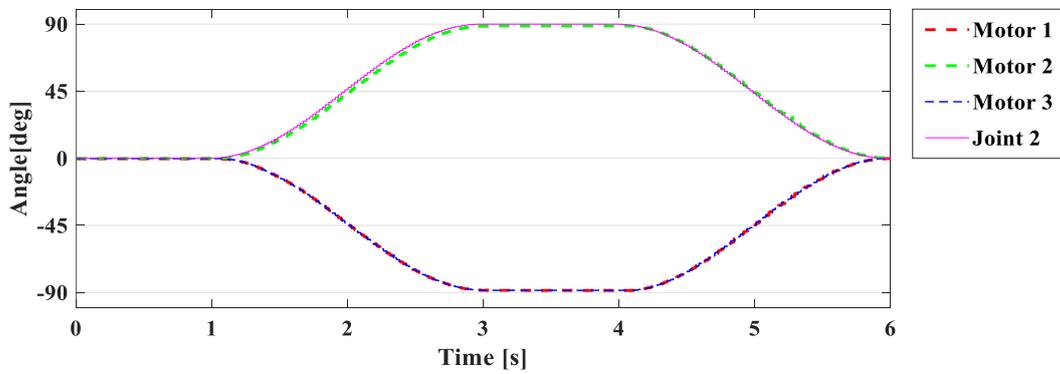


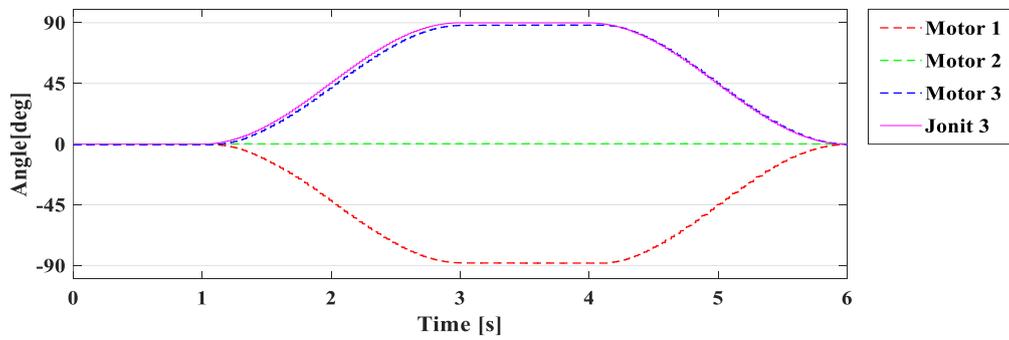
Fig. 5-32. Angle experiment of robot arm A type. (a) Rotation of each joint in the shoulder joint (b) Rotation of each joint in the elbow joint (c) Rotation of each joint in the wrist joint



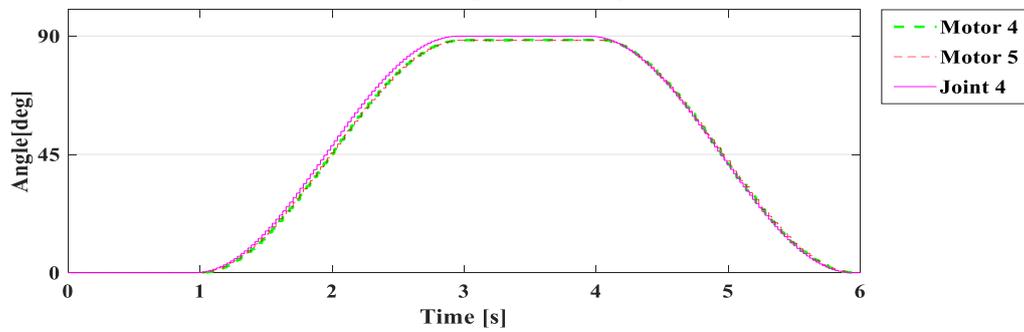
(a) Motor position of joint 1



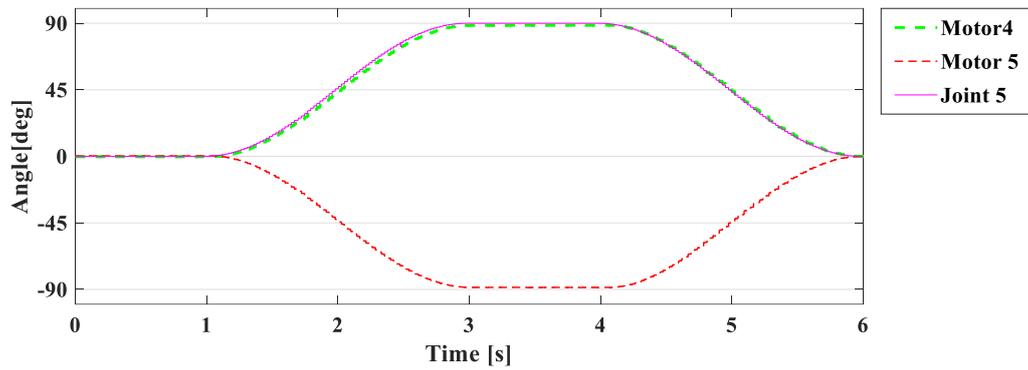
(b) Motor position of joint 2



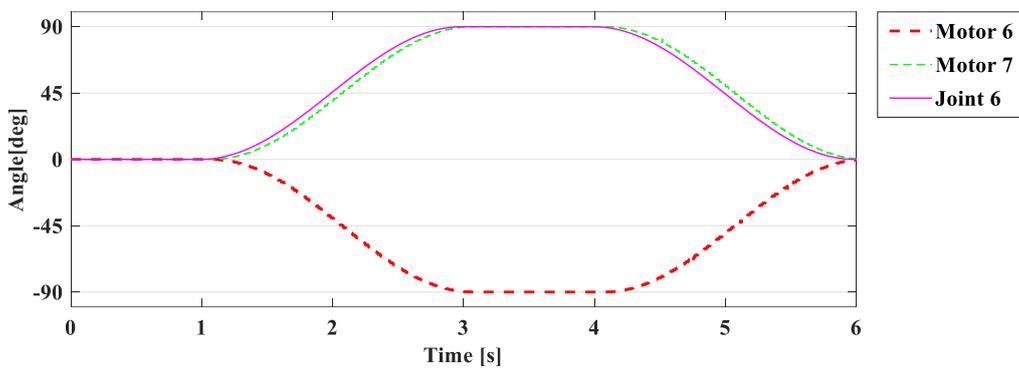
(c) Motor position of joint 3



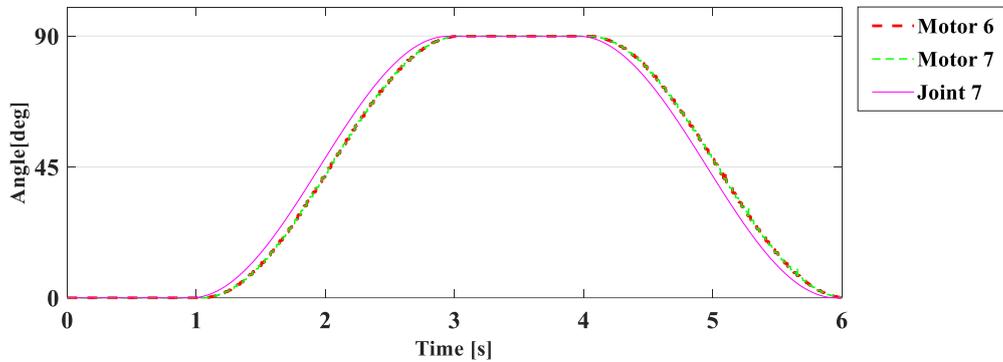
(d) Motor position of joint 4



(e) Motor position of joint 5



(f) Motor position of joint 6



(g) Motor position of joint 7

Fig. 5-33. Motor position of robot arm A type (a)(b)(c) are motors position of shoulder joint. (d)(e) are motors position of elbow joint. (f)(g) are motor position of wrist joint.

図 5-32 に、各関節の回転が示されている。無負荷の下、各関節を図に示されたように  $0^\circ$  から  $90^\circ$  まで回転させたとき、モーターのフィードバック位置は図 5-33 のように示される。(a), (b), (c) は、関節 1, 関節 2, 関節 3 がそれぞれ回転する時の肩関節におけるモーターのフィードバック位置を表している。同様に、(d) と (e) は関節 4

と関節 5 が回転する時の肘関節におけるモーターのフィードバック位置, (f) と (g) は関節 6 と関節 7 が回転する時の手首関節におけるモーターのフィードバック位置をそれぞれ表している. 紫色の線は関節の位置を表している. ここで, 式 (5-12)  $T = AT_m$  によりモーター位置と関節位置を表す式  $\theta_m = A^T \theta$  が得られる. 2.4 節を参照していただければわかるように, 計算結果は実験結果と一致している.

### 5.7.3.2 消費電流の検証実験

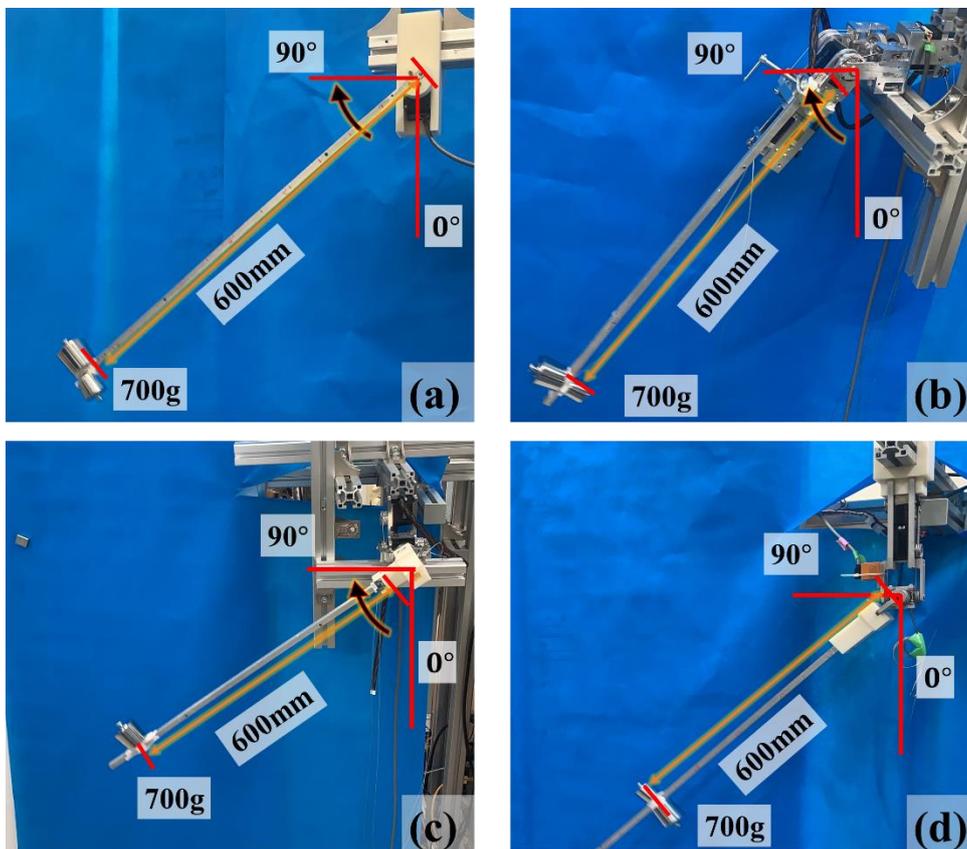
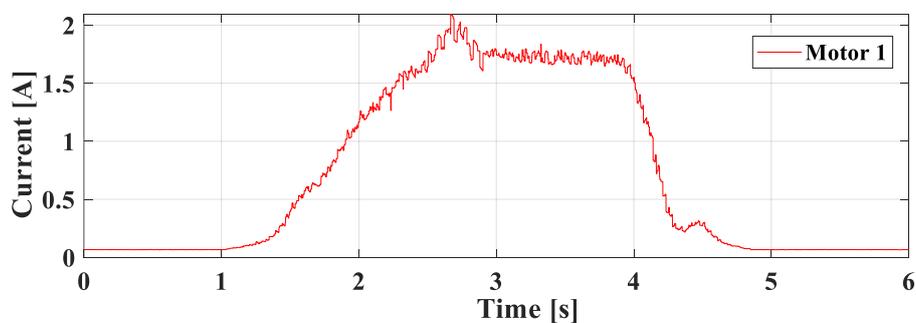
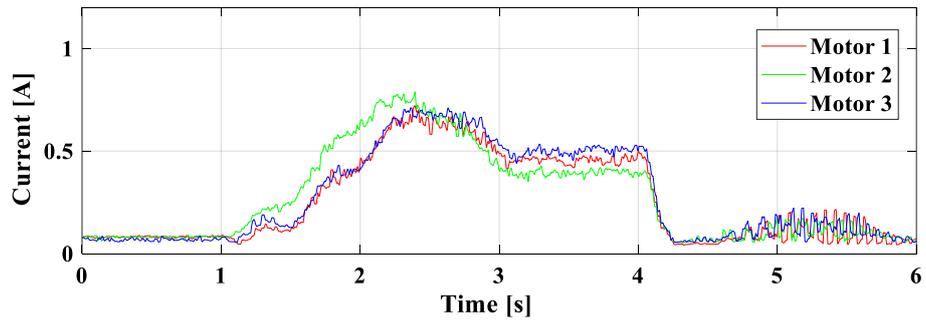
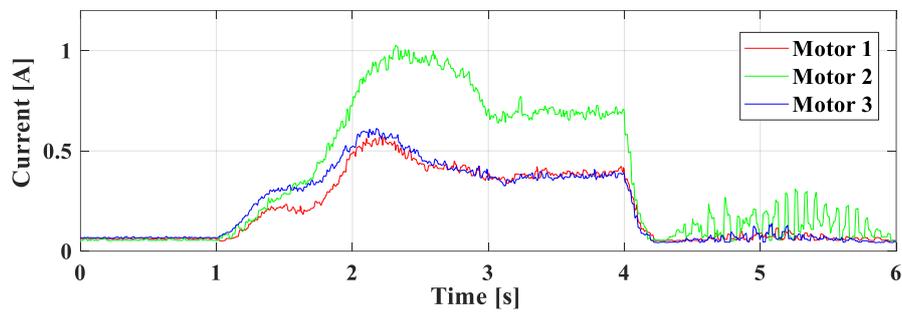
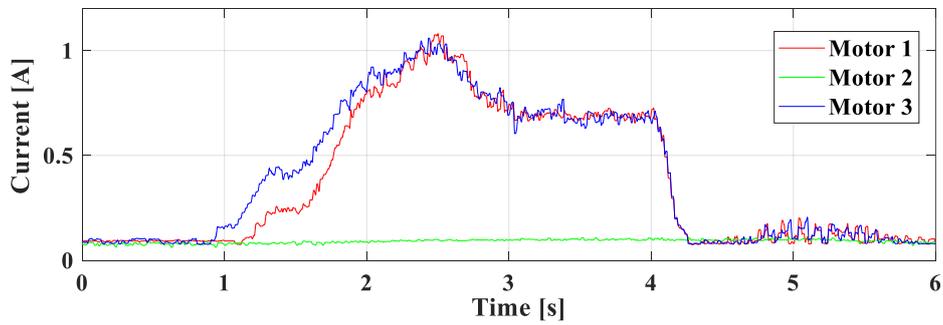
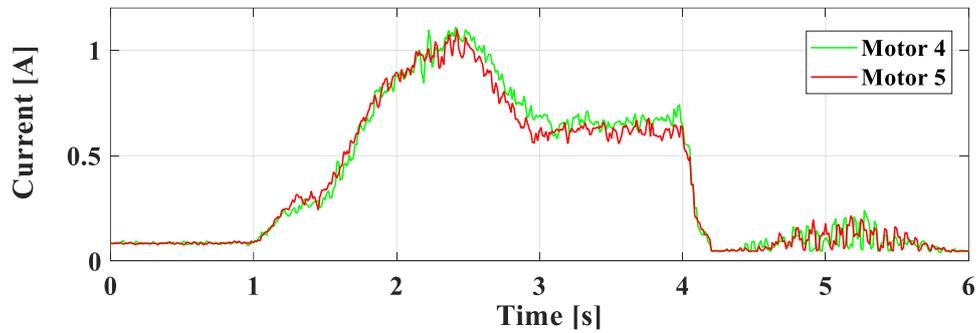
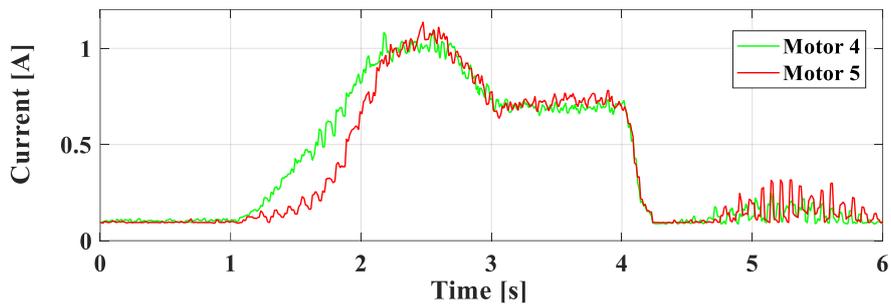


Fig. 5-34. Current consumption experiment(A type). (a) The motor drives directly to lift a load. (b) Each joint of the shoulder joint to lift the same load. (c) Each joint of the elbow joint to lift the same load. (d) Each joint of the shoulder joint to lift the wrist load.

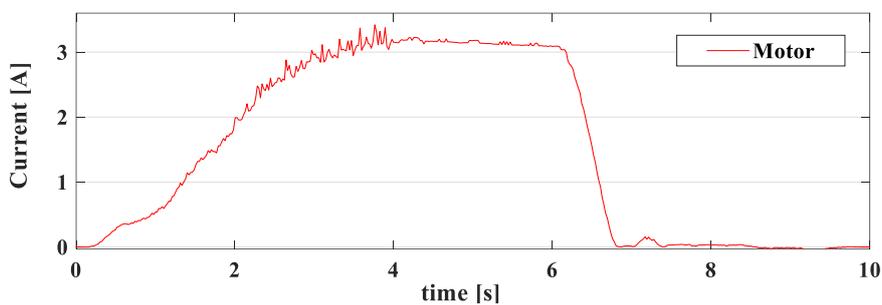


(a) Direct drive with B3M-SC-1170-A

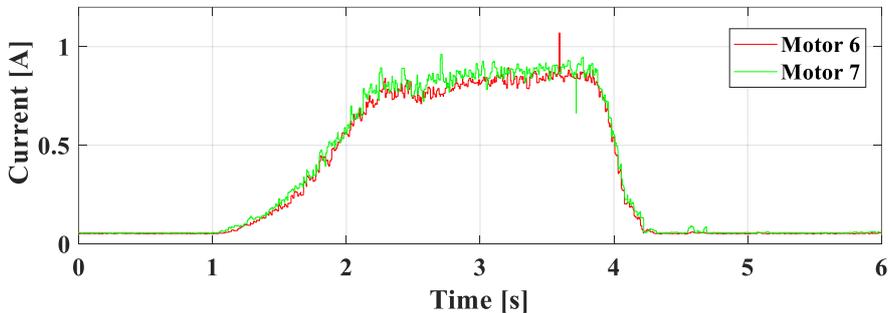
(b) Separate rotation of  $J_1$ (c) Separate rotation of  $J_2$ (d) Separate rotation of  $J_3$ (e) Separate rotation of  $J_4$



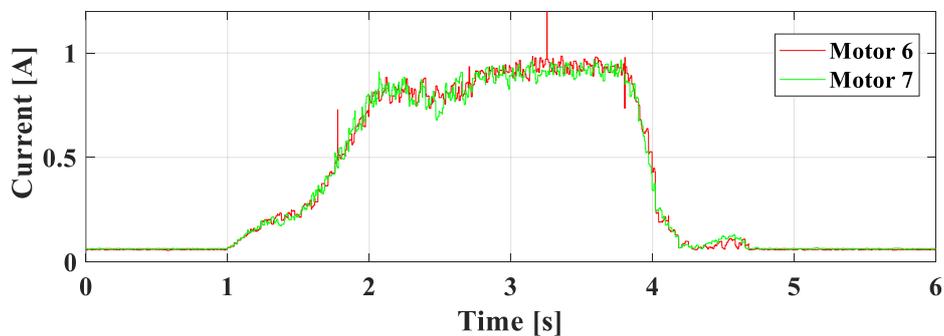
(f) Separate rotation of  $J_5$



(g) Direct drive with B3M-SC-1040-A



(h) Separate rotation of  $J_6$



(i) Separate rotation of  $J_7$

Fig. 5-35. Current consumption of motors (A type). (a) and (g) are direct drive of motors. (b)-(f) and (h) (i) Separate rotation of Each joint

干渉駆動と直接駆動のモーターの消費電流を比較することで、モータートルクと関節トルクの関係を検証する。700gの負荷を回転軸から600mmの位置に置く（この負荷はモーターで直接駆動できる負荷のうち、ほぼ最大の負荷である）。各関節を図5-34に示された0°から90°に回転させ、また0°に戻す。この時のモーターの消費電流を記録し、図5-35にまとめた。(a)はB3M-SC-1170-Aモーターで直接駆動した時の消費電流、(b)、(c)、(d)は肩関節のモーターの消費電流、(e)と(f)は肘関節のモーターの消費電流をそれぞれ表している。肩関節と肘関節は両方ともB3M-SC-1170-Aモーターを使用した。(g)はB3M-SC-1140-Aモーターで直接駆動した時の消費電流、(g)と(h)は手首関節のモーターの消費電流をそれぞれ表している。手首にはB3M-SC-1140-Aモーターを使用した。ここで式(5-12)  $T = AT_m$  および2.4節によれば、実験結果は理論的解析と一致していることが分かる。また、肩関節の電流比は4.7節にある表4.5と一致し、さらに肘関節と手首関節の消費電流はそれぞれのモーターを直接駆動した時の半分であることから、ワイヤ干渉駆動におけるトルクの再分配原理と機構の有効性を示せた。

### 5.7.4 ロボットアーム- Bタイプの検証実験

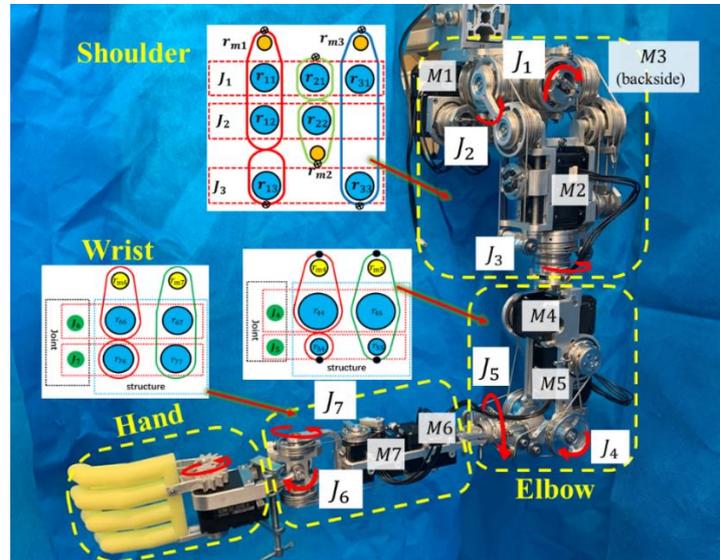
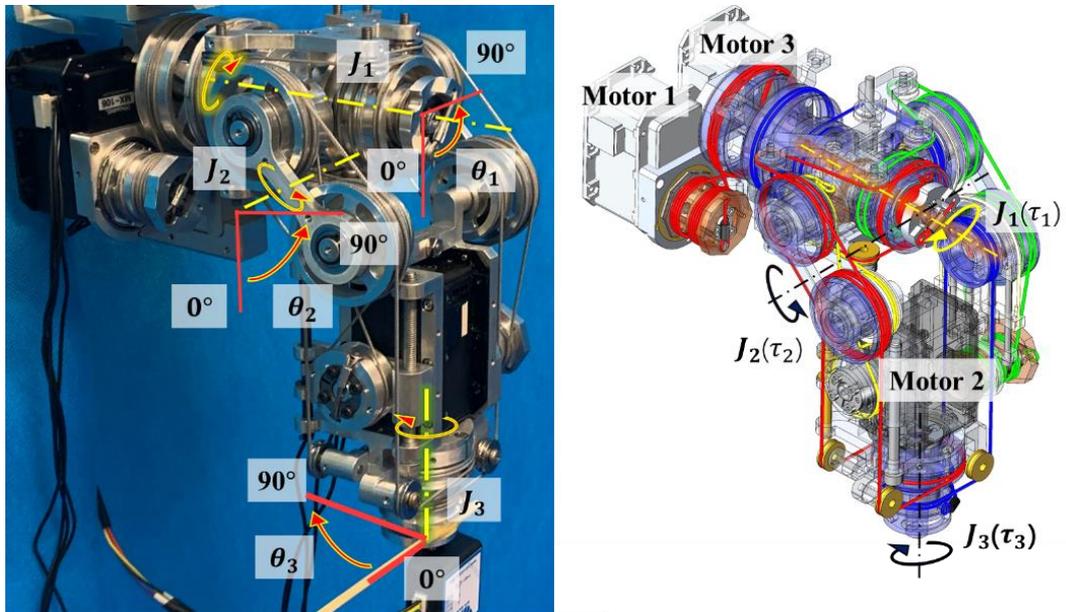


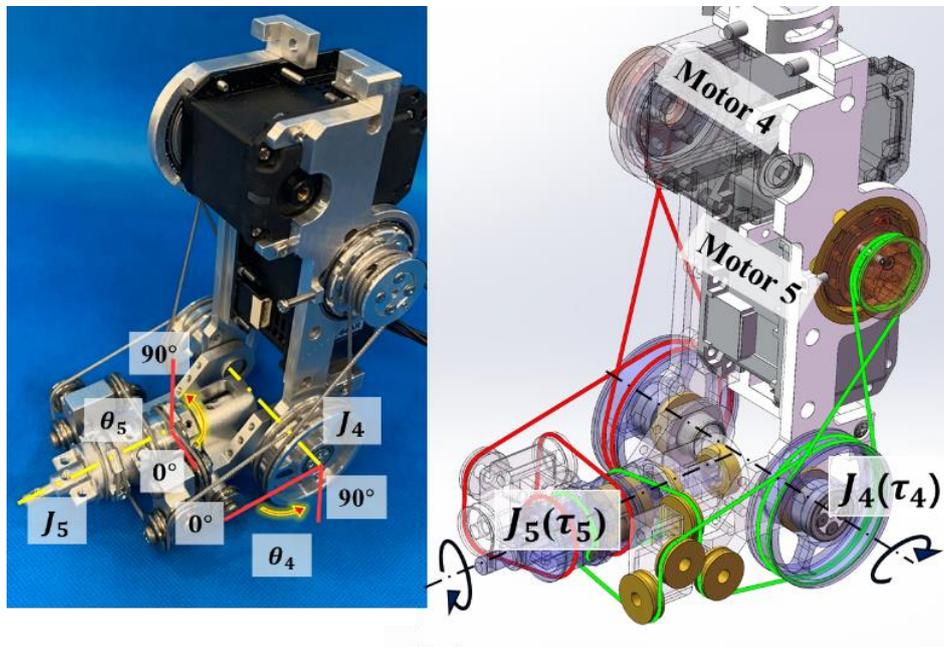
Fig. 5-36. Wire routing of robot arm B type

図 5-36 はロボットアーム-B タイプのモーター番号と位置，各関節のワイヤルーティング方法と関節の番号を示している. 図 5-36 に示された関節をそれぞれ回転させ，下記の角度実験と消費電流実験の結果を得た.

5.7.4.1 角度の検証実験



(a)



(b)

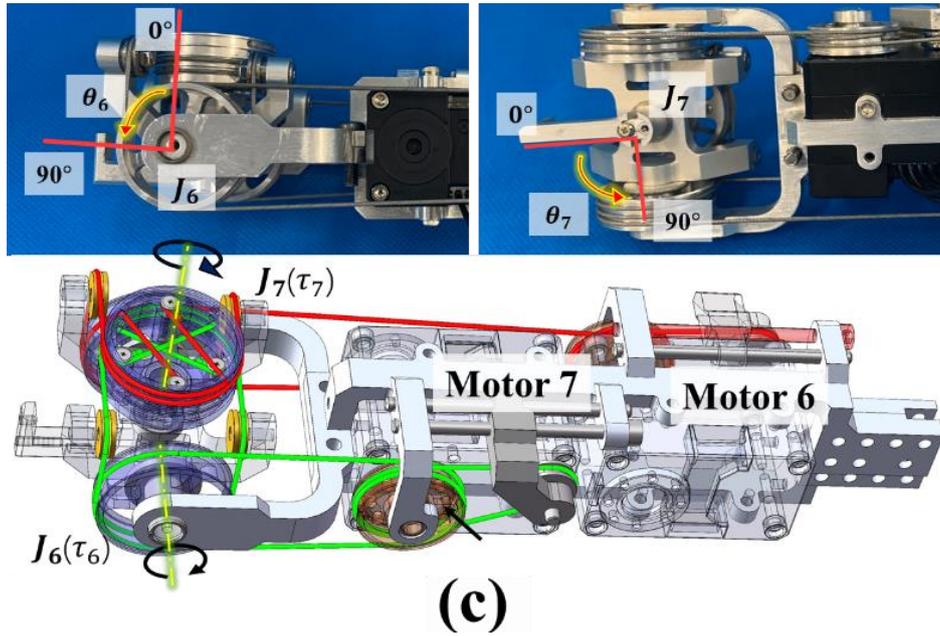
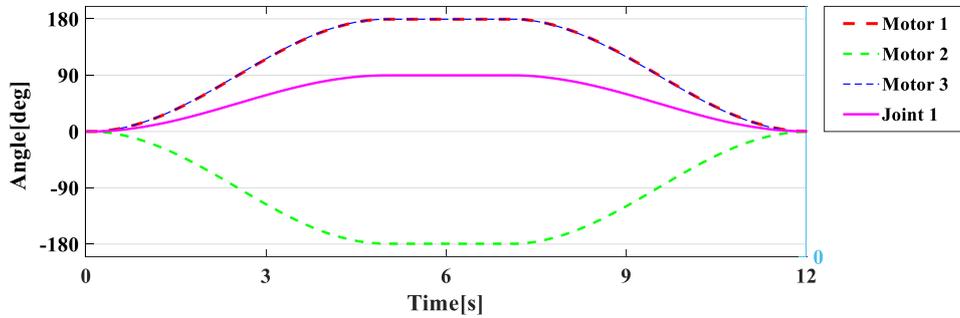
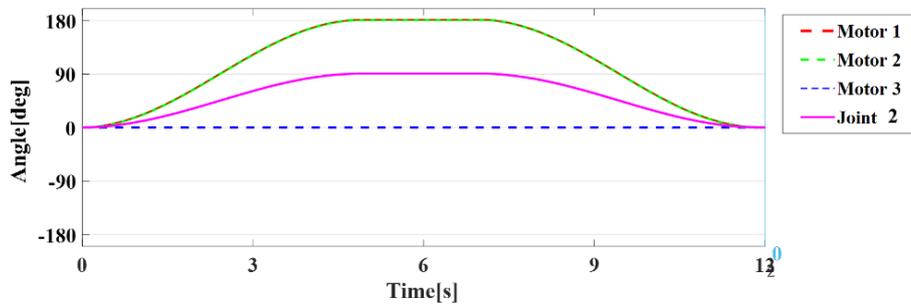


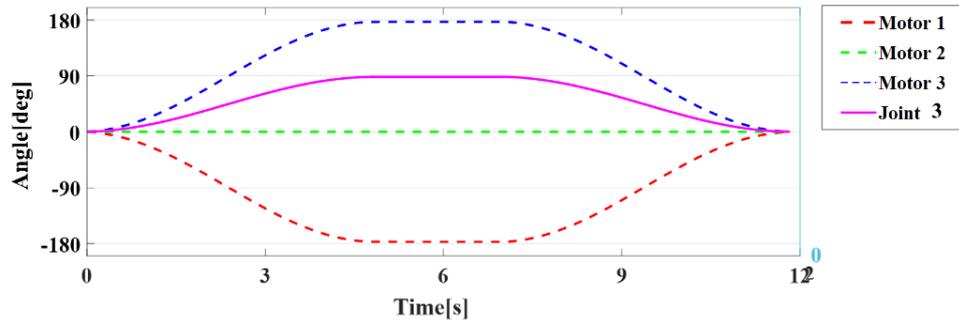
Fig. 5-37. Angle experiment of robot arm B type. (a) Rotation of each joint in the shoulder joint (b) Rotation of each joint in the elbow joint (c) Rotation of each joint in the wrist joint



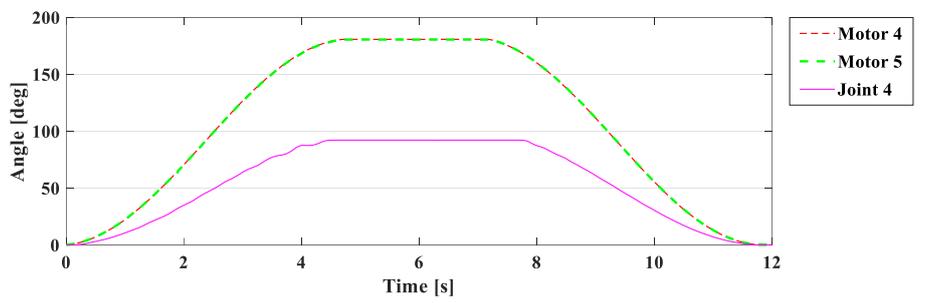
(a) Motor position of joint 1



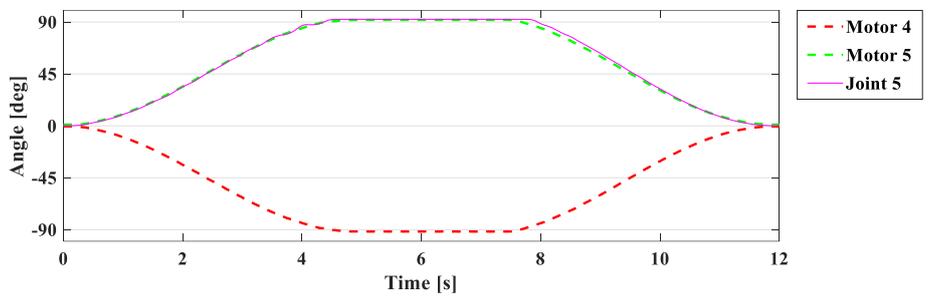
(b) Motor position of joint 2



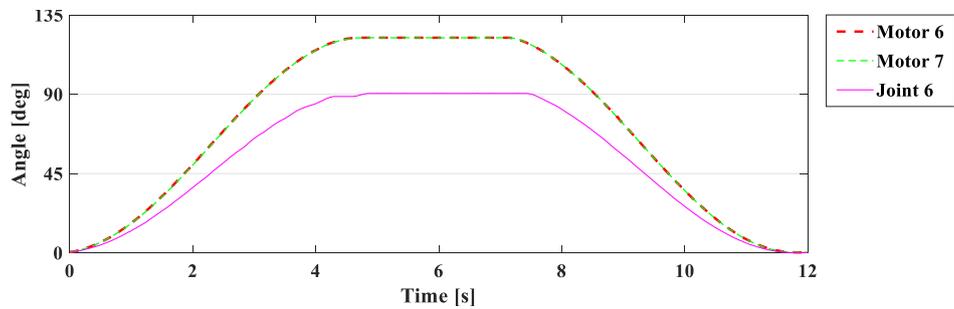
(c) Motor position of joint 3



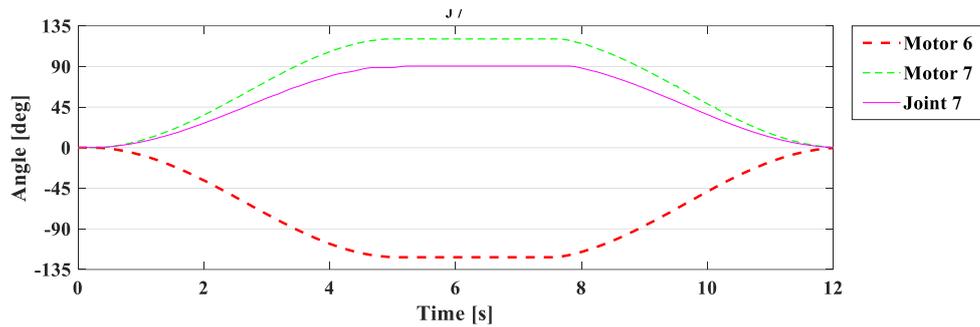
(d) Motor position of joint 4



(e) Motor position of joint 5



(f) Motor position of joint 6



(g) Motor position of joint 7

Fig. 5-38. Motor position of robot arm B type (a)(b)(c) are motors position of shoulder joint. (d)(e) are motors position of elbow joint. (f)(g) are motor position of wrist joint.

図 5-37 は各関節の回転角度を示している。無負荷の下、各関節を図に示されるように  $0^\circ$  から  $90^\circ$  まで回転させる。図 5-38 はモーター位置のフィードバックデータを表している。それぞれ、(a), (b), (c) は肩関節のモーター位置のフィードバックデータ、(d) と (e) は肘関節のモーター位置フィードバックデータ、(f) と (g) は手首関節のモーター位置のフィードバックデータを表している。紫色の線は関節の回転角度を表している。ここで式 (5-13)  $T = AT_m$  により、モーター位置と関節位置を表す式  $\theta_m = A^T \theta$  が得られる。2.4 節を参照していただければわかるように、計算結果は実験結果と一致している。

## 5.7.4.2 消費電流の検証実験

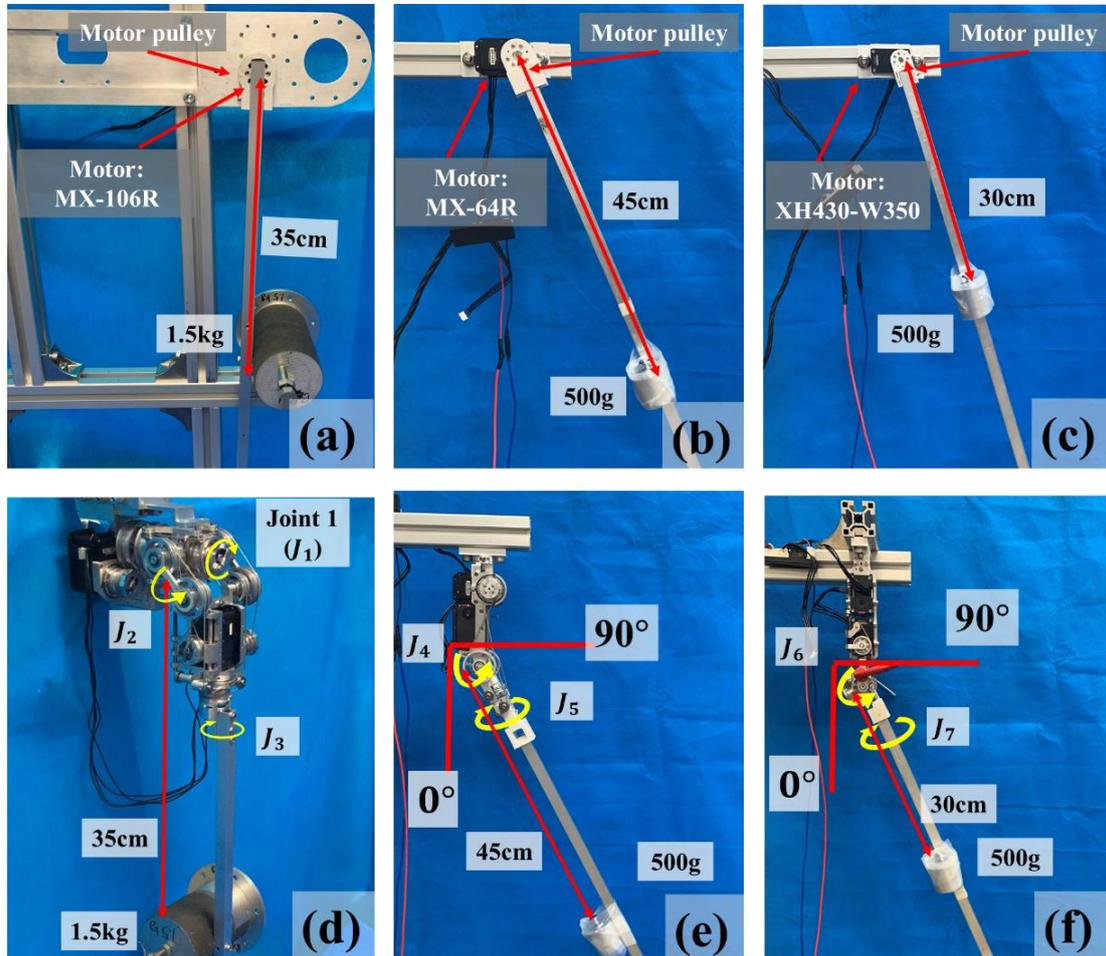
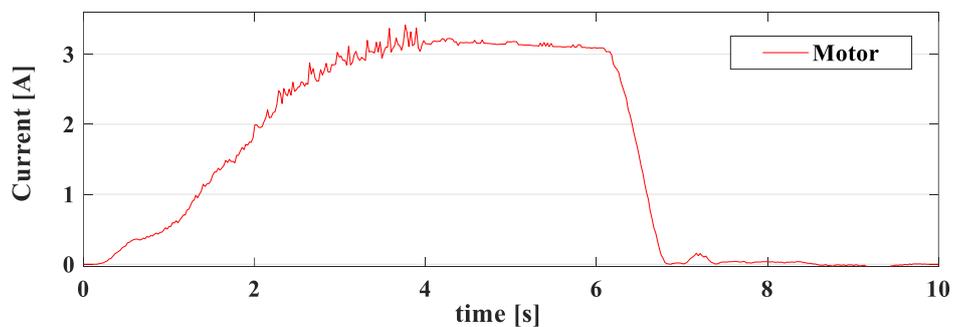
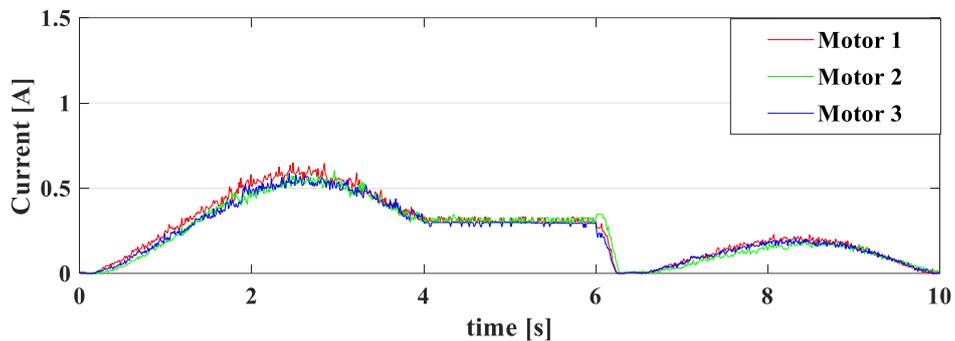


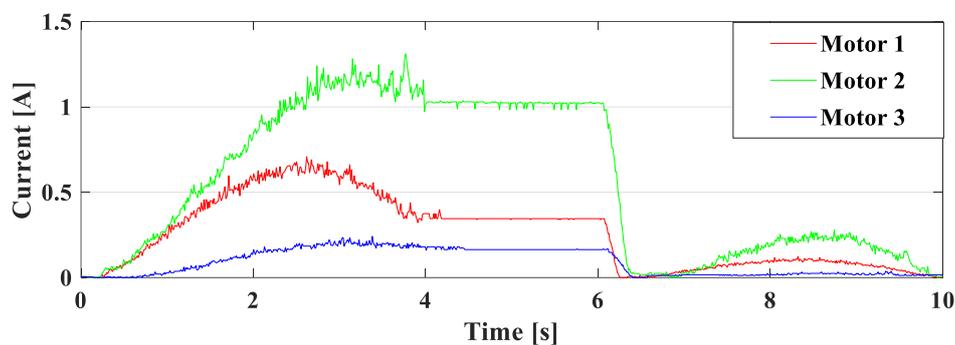
Fig. 5-39. Current consumption experiment(B type). (a), (b) and (c) are motor drives directly to lift a load. (d) Each joint of the shoulder joint to lift the same load. (e) Each joint of the elbow joint to lift the same load. (f) Each joint of the shoulder joint to lift the wrist load.



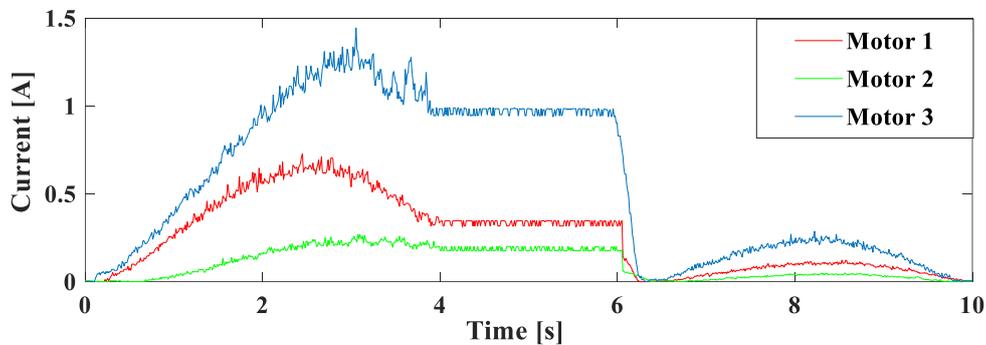
(a) Direct drive with Dynamixel MX-106R



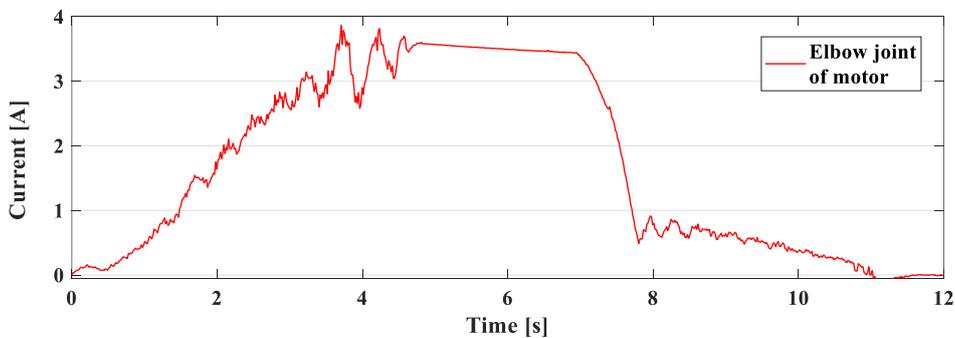
(b) Separate rotation of  $J_1$



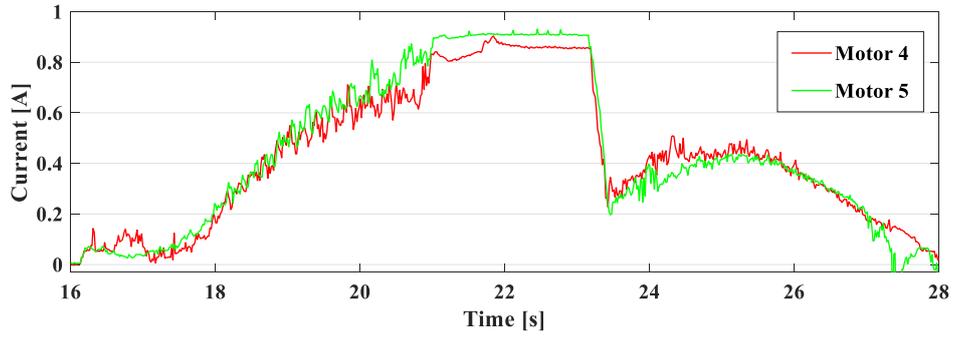
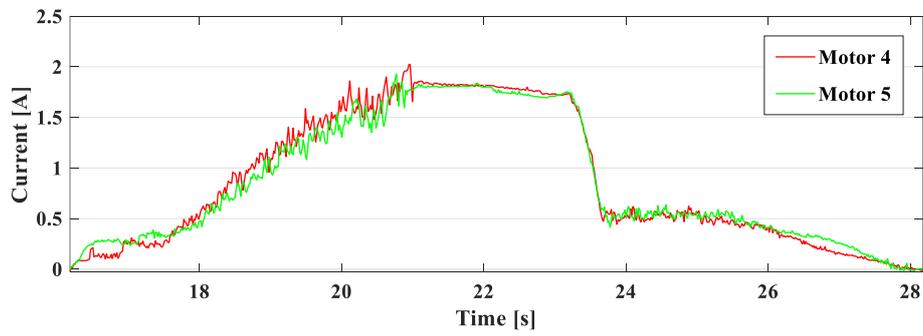
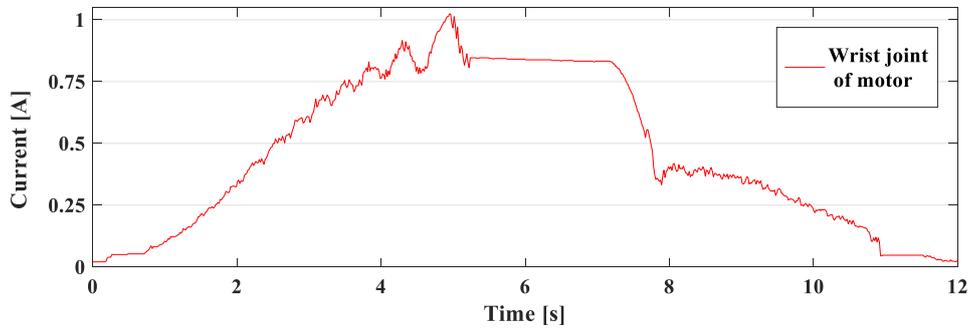
(c) Separate rotation of  $J_2$



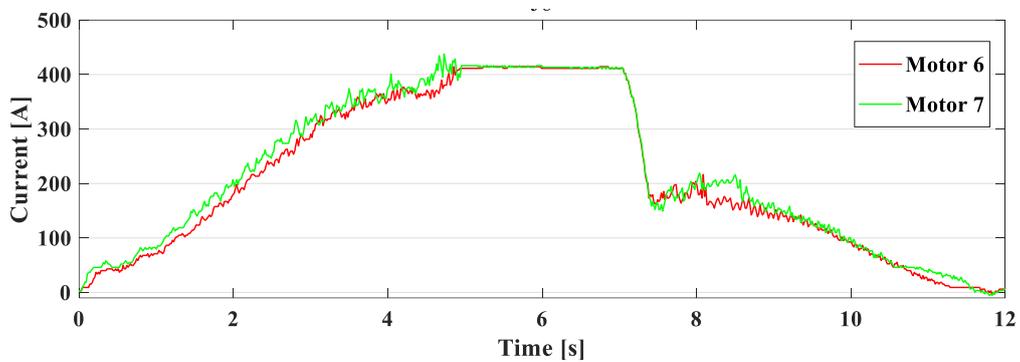
(d) Separate rotation of  $J_3$

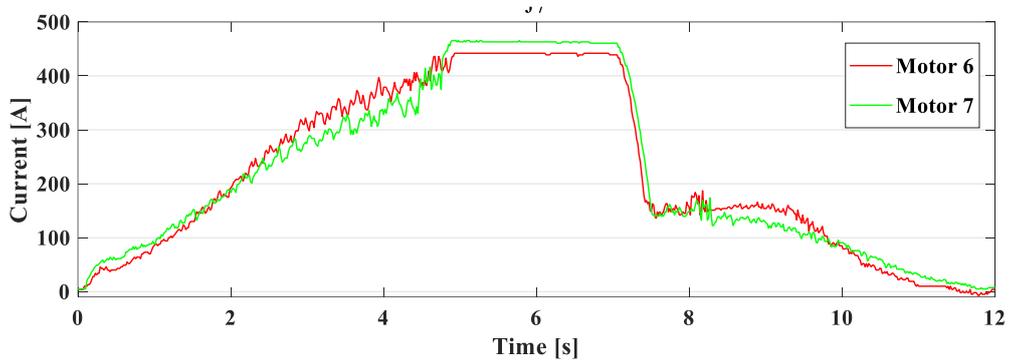


(e) Direct drive with Dynamixel MX-64R

(f) Separate rotation of  $J_4$ (g) Separate rotation of  $J_5$ 

(h) Direct drive with Dynamixel XH430-W350

(i) Separate rotation of  $J_6$



(j) Separate rotation of  $J_7$

Fig. 5-40. Current consumption of motors (B type). (a) (e) and (h) are direct drive of motors. (b)-(d),(f) and (g), (i) and (j) Separate rotation of Each joint.

干渉駆動と直接駆動のモーターの消費電流を比較することでモータートルクと関節トルクの関係を検証する。図 5-39 は消費電流の実験過程である。(d), (e), (f) はそれぞれ肩関節, 肘関節と手首関節の実験写真である。3つの関節モジュールは異なるタイプのモーターを使用しており, 肩関節のモーターは Dynamixel MX-106R, 肘関節のモーターは Dynamixel MX-64R, 手首関節のモーターは Dynamixel XH430-W350 を使用した。対応するモーターの直接駆動の実験写真はそれぞれ (a), (b) と (c) である。図 5-39 に示された負荷重量は, モーターで直接駆動する時のほぼ最大の負荷である。

ロボットアームの関節を図 5-39 に示された  $0^\circ$  から  $90^\circ$  まで回転させ, また  $0^\circ$  に戻す。この時のモーターの消費電流を記録し, 図 5-40 にまとめた。図 5-40 の (a), (e), (h) はそれぞれ 3 種のモーターで直接駆動した時の消費電流で, 3 つの図の電流はほぼモーターの限界である。(b), (c), (d) は肩関節がそれぞれ回転するときのモーターの消費電流, (f) と (g) は肘関節のモーターの消費電流, (i) と (j) は手首関節のモーターの消費電流である。ここで式 (5-13)  $T = AT_m$  および 2.4 節により, 各関節におけるモーターの消費電流とモーターで直接駆動した時の消費電流の関係は理論的解析と一致していることが分かる。

### 5.7.5 繰り返し精度に関する評価実験

本論文ではロボットアームの性能について実験しており、主にロボットアームの繰り返し精度について測定した。ここではあらかじめロボットアームの動作経路を設定した後、磁気式モーションキャプチャ（Motion Tracking System : Liberty, Polhemus, USA 表 5-1）でロボットアームの動きを追跡し、複数回ロボットアームを繰り返し運動させた際、常に同一経路の運動を行うか、及び同じ目標位置に達するか、の2点を検証する。

Table 5-1. Polhemus Motion Tracking System

項目	説明
精度 (RMS)	位置:0.76mm, 角度:0.15 度 (トランスミッタとレシーバ間距離:762mm)
分解能	位置:0.00381mm, 角度:0.0012 度 (トランスミッタとレシーバ間距離:約 305mm)
測定範囲	トランスミッタ (TX-4) の周囲約 106cm
インターフェイス	RS232 もしくは USB
サンプリングレート	レシーバで最大 240 ポイント/秒
反応速度	3.5 ミリ秒

### 5.7.5.1 ロボットアーム-Aタイプの精度実験

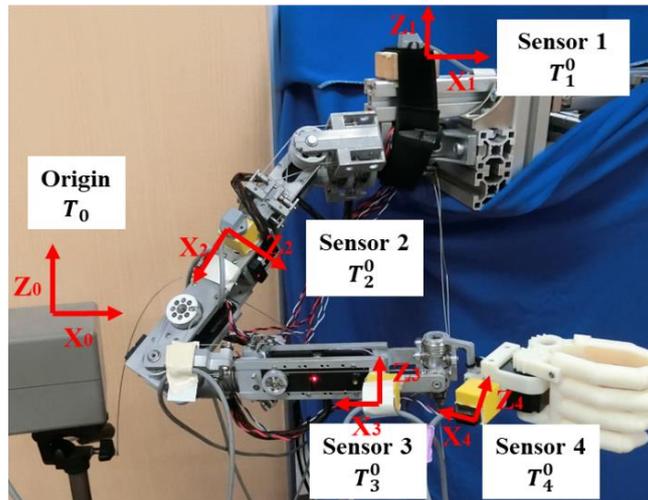


Fig. 5-41. Position accuracy experiment of robot arm A type

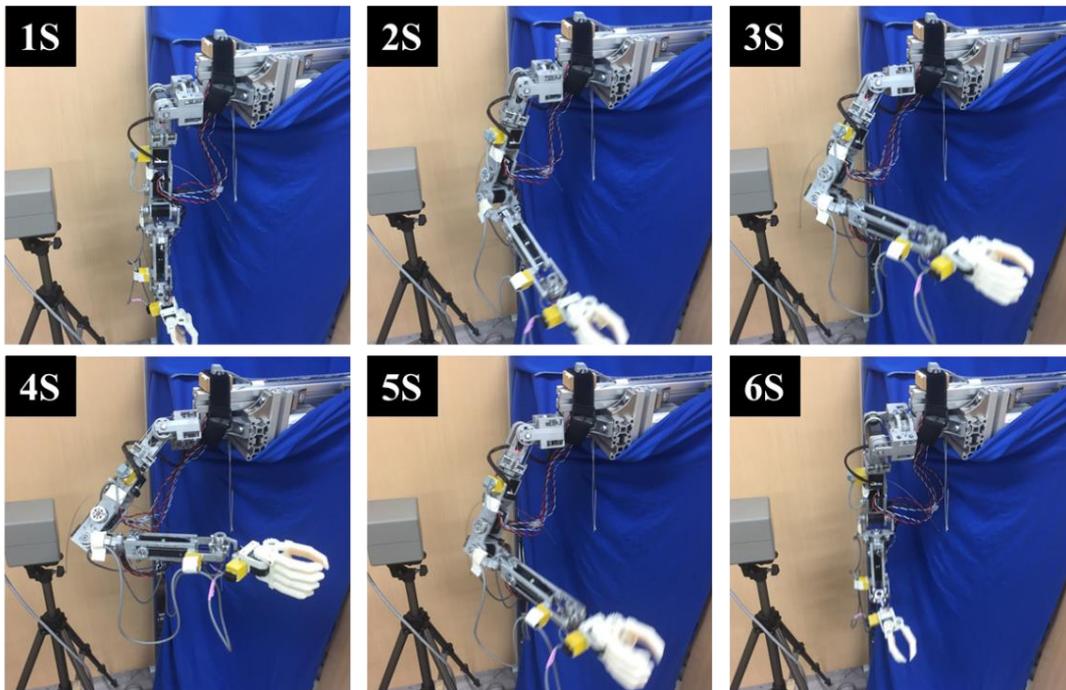
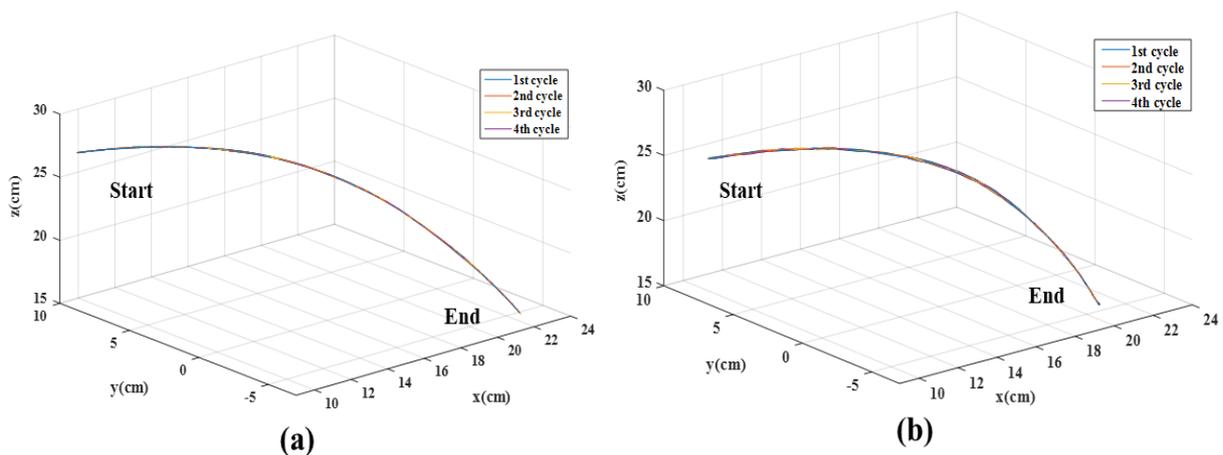


Fig. 5-42. Experiment procedure of robot arm A type

図 5-41 はロボットアーム-A タイプの繰り返し精度実験の原理図である。使用した Polhemus LIBERTY system は一つの位置収集装置 ( $x_0$ - $y_0$ - $z_0$ ) と 4 つの位置センサーで

構成される。それぞれ、センサー1 をロボットアームの固定ブラケットに、センサー2 を肘関節モジュールに、センサー3 を手首関節モジュールに、センサー4 をハンドに配置する。ロボットアームの肩関節がブラケットに固定されたため、オイラー角変換の計算法を用いる。ここで、それぞれセンサー2 とセンサー1 の相対位置変化( $T_0^1 T_2^0 = T_2^1$ )は肩関節モジュールの運動状態、センサー3 とセンサー2 の相対位置変化( $T_0^2 T_3^0 = T_3^2$ )は肘関節モジュールの運動状態、センサー4 とセンサー3 の相対位置変化( $T_0^3 T_4^0 = T_4^3$ )は実際手首関節モジュールの運動状態、センサー4 とセンサー1 の相対位置変化( $T_0^1 T_4^0 = T_4^1$ )はアームの末端の運動状態である。

次にロボットアームの経路を設定した。図 5-42 は 1 回のロボットアームの運動サイクルを表す。各移動は初期位置 (1s) から指定された位置 (4s) まで移動し、また同じ経路で初期位置に戻るというもので、この運動を繰り返す。起点と終点との間の経路により設定され、実験ではモーターの位置を制御することで経路を追従した。この運動を 4 回繰り返す。起点位置、終点位置、一方向経路 (起点→終点または終点→起点)、双方向経路 (起点→終点→起点) の最大誤差をそれぞれ計算した。負荷は無負荷と負荷 500g の 2 種類とした。



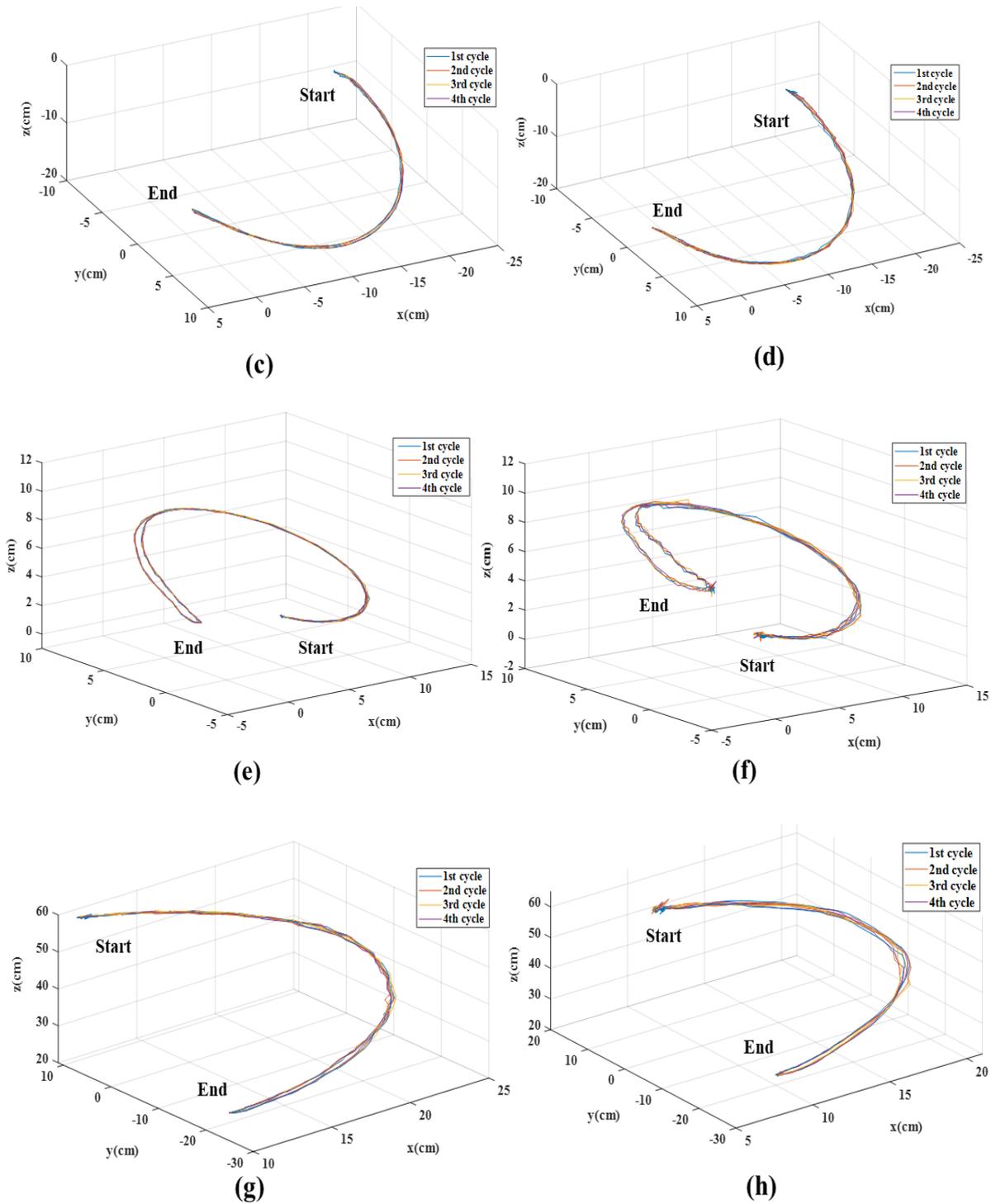


Fig. 5-43. Paths of the three joint modules and the arm without Load(robot arm A type) (a) shoulder joint module, (c) elbow joint module, (e) wrist joint module, (g) entire arm. Paths of the three joint modules and the arm with 500g Load: (b) shoulder joint module, (d) elbow joint module, (f) wrist joint module, (h) entire arm.

図 5-43 の (a), (c), (e) はそれぞれ無負荷時の肩関節, 肘関節, 手首関節の動作経路, 図 5-46 の (b), (d), (f) はそれぞれ負荷を 500g とした時の肩関節, 肘関節, 手首関節の動作経路である. 図 5-43 の (g) と (h) はそれぞれ無負荷と負荷状態のロボットアームの末端の経路である.

表 5-2 に, 4 回の繰り返し運動を行った際の起点位置, 終点位置, 一方向経路, 双方向経路の最大誤差がそれぞれ示されている. ロボットアームの起点位置と終点位置の精度が高く, 無負荷状態と負荷状態では精度に大きな違いはなかった. 一方, ロボットアームの末端の一方向経路と双方向経路の誤差が大きかった. 図 5-43 (e) と (f) を比較すればわかるが, 誤差は主に手首に起因する. 手首に使用されているワイヤは肩関節と肘関節のワイヤより細く, 重量と加速度によって伸縮しやすくなる. そして, 手首の加工精度も高くなく機械的な隙間があるため, 誤差も引き起こされやすい. また, 起点位置から終点位置までの経路と終点位置から起点位置までの経路上の摩擦力の方向が異なり, この摩擦力は双方向経路の繰り返し精度を下げた原因の一つと考えられる.

Table 5-2. Maximum errors of robot arm A type

Joint Module		Without load				With load (500g)			
		Start position	End position	One-way path	Round-way path	Start position	End position	One-way path	Round-way path
Shoulder	d*	0.21 **	0.19	0.21	0.54	0.19	0.18	0.20	0.57
	x	0.10	0.06	0.01	0.14	0.10	0.09	0.02	0.11
	y	0.15	0.14	0.16	0.28	0.12	0.16	0.12	0.37
	z	0.11	0.12	0.13	0.44	0.11	0.02	0.16	0.42
Elbow	d	0.13	0.19	0.26	0.49	0.13	0.20	0.27	0.56
	x	0.06	0.13	0.10	0.43	0.04	0.19	0.11	0.22
	y	0.05	0.09	0.24	0.21	0.04	0.04	0.23	0.31
	z	0.10	0.10	0.03	0.09	0.12	0.06	0.10	0.41
Wrist	d	0.13	0.14	0.42	1.17	0.22	0.23	0.59	1.40
	x	0.10	0.04	0.35	0.39	0.20	0.09	0.18	0.13
	y	0.05	0.06	0.13	0.81	0.02	0.12	0.23	0.69
	z	0.07	0.12	0.19	0.75	0.10	0.17	0.51	1.21
Arm	d	0.26	0.22	0.52	1.23	0.38	0.35	0.79	1.52
	x	0.19	0.16	0.10	0.22	0.21	0.24	0.11	0.28
	y	0.17	0.12	0.06	0.51	0.31	0.21	0.03	0.71
	z	0.01	0.10	0.51	1.10	0.04	0.15	0.78	1.31

\*d: distance; x, y, z: the errors along the 3 axes;  $d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

\*\*unit: cm

## 5.7.5.2 ロボットアーム- Bタイプの精度実験

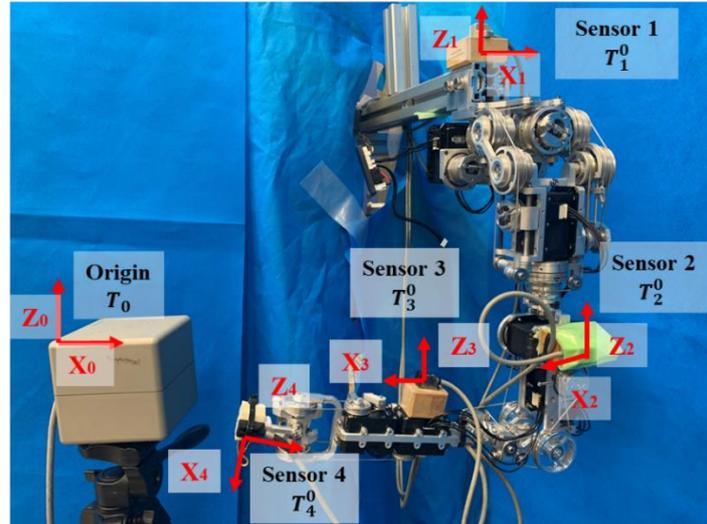


Fig. 5-44. Position accuracy experiment of robot arm B type

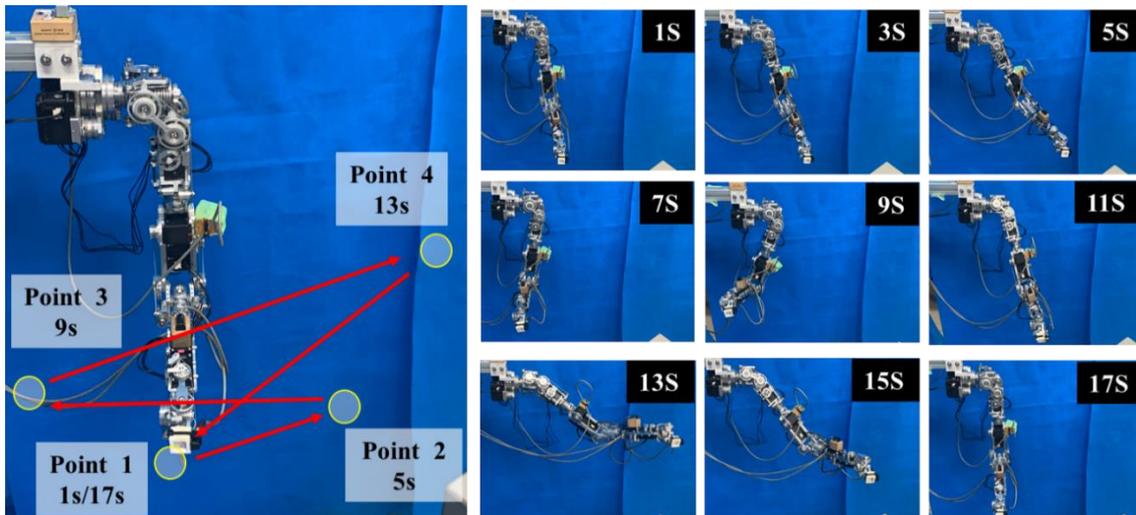
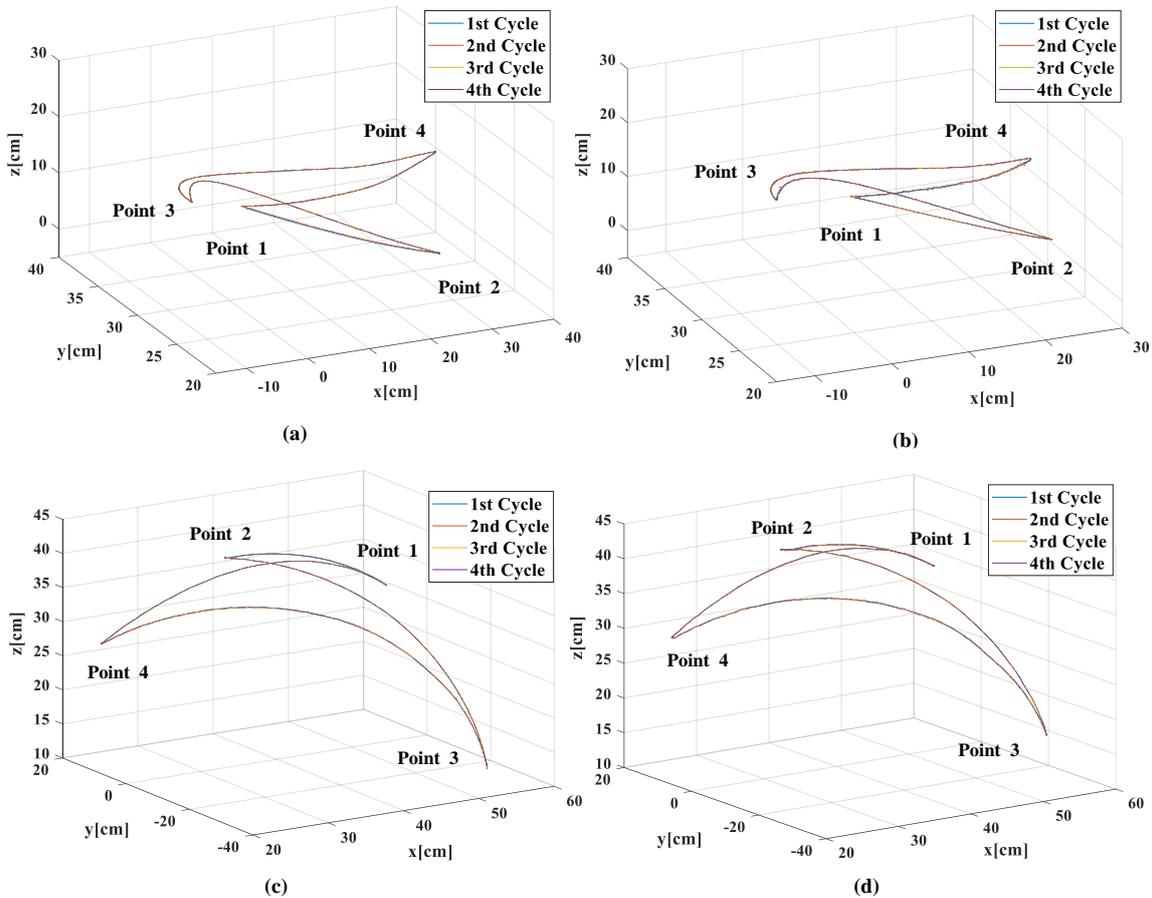


Fig. 5-45. Experiment procedure of robot arm B type

図 5-44 はロボットアーム-B タイプの繰り返し精度実験の原理図である。使用した Polhemus LIBERTY system は一つの位置収集装置 ( $x_0$ - $y_0$ - $z_0$ ) と 4 つの位置センサーで構成される。それぞれ、センサー1 をロボットアームの固定ブラケットに、センサー2 を肘関節モジュールに、センサー3 を手首関節モジュールに、センサー4 をハンドに配置する。ロボットアームの肩関節がブラケットに固定されたため、オイラー角変換

の計算法を用いる。それぞれ、センサー2 とセンサー1 の相対位置変化( $T_0^1 T_2^0 = T_2^1$ )は肩関節モジュールの運動軌道, センサー3 とセンサー2 の相対位置変化( $T_0^2 T_3^0 = T_3^2$ )は肘関節モジュールの運動軌道, センサー4 とセンサー3 の相対位置変化( $T_0^3 T_4^0 = T_4^3$ )は手首関節モジュールの運動軌道, センサー4 とセンサー1 の相対位置変化( $T_0^1 T_4^0 = T_4^1$ )はアームの末端の運動軌道である。

次にロボットアームの運動軌道を設定した。図 5-45 は 1 回のロボットアームの運動サイクルを表す。ロボットアームの端を図 5-45 (左) に従って初期位置 (ポイント 1) からポイント 2 とポイント 3 に移動し, 最後に初期位置に戻る。ロボットアームが 2 つの隣接するポイント間を移動する時間は 4 秒である。ロボットアームタイプ B の制御はロボットアームタイプ A の制御と同様に同じ経路を 4 回繰り返し, 各ポイントの位置及び運動軌道の最大誤差を計算した。負荷は無負荷と負荷 500g の 2 種類とした。



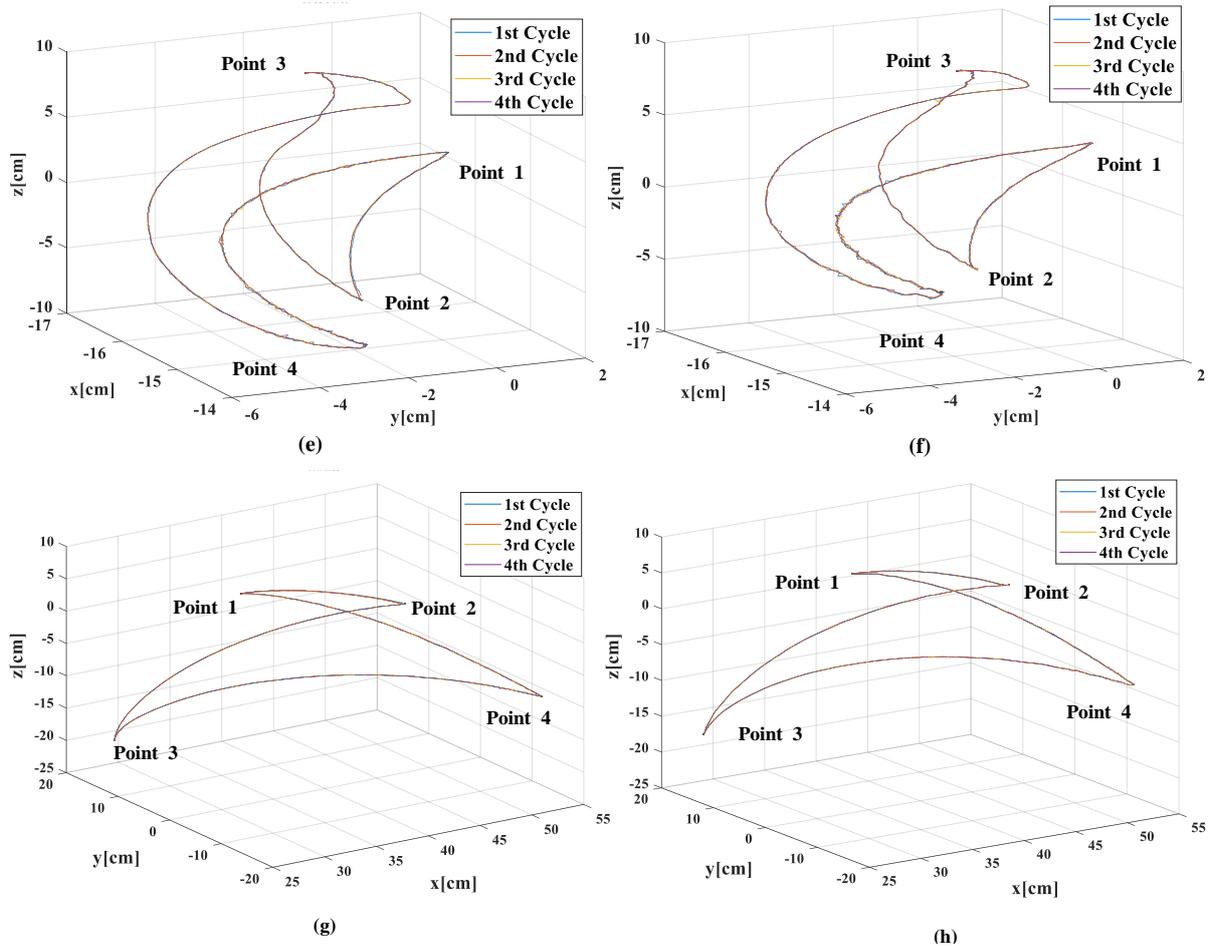


Fig. 5-46. Paths of the three joint modules and the arm without Load(robot arm B type) (a) shoulder joint module, (c) elbow joint module, (e) wrist joint module, (g) entire arm. Paths of the three joint modules and the arm with 500g Load: (b) shoulder joint module, (d) elbow joint module, (f) wrist joint module, (h) entire arm.

図 5-46 (a), (c), (e) はそれぞれ無負荷時の肩関節, 肘関節, 手首関節の運動軌跡, 図 5-46 (b), (d), (f) はそれぞれ負荷が 700g 時の肩関節, 肘関節, 手首関節の運動軌跡である. 図 5-46 (g) と (h) は, それぞれ無負荷状態と負荷状態のロボットアーム末端の運動軌跡である.

表 5-3 に各点と運動軌跡の最大誤差が示されている. 表から, ロボットアーム-B タイプの位置精度がロボットアーム-A タイプの位置精度よりもはるかに高いことがわかる. 原因は以下のものが挙げられる. 1, 機械の機構を再設計し, ロボットアームが動く時の部品間の隙間による誤差の問題を解決した. 2, 再設計されたワイヤ張力調

整装置により、機構内のワイヤ張力の調整が容易になった。3, アームが動いているとき、ロボットアーム-B タイプのモーターの振動はロボットアーム-A タイプのより小さいものにした。これらを総合的に見て、ロボットアーム-B タイプの繰り返し精度は高いものとなったことが分かる。

Table 5-3. Maximum errors of robot arm B type

Joint Module		Without load					With load (700g)				
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	way path	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	way path
Shoulder	d*	0.5**	0.58	0.65	0.42	1.31	0.76	0.84	0.72	0.89	1.55
	x	0.30	-0.30	-0.10	-0.40	-0.50	-0.30	-0.70	-0.62	0.40	-1.40
	y	-0.20	0.00	-0.40	0.10	-0.54	-0.60	-0.40	-0.20	-0.77	-0.60
	z	-0.33	0.50	0.50	0.10	1.11	0.36	-0.25	-0.30	-0.20	0.30
Elbow	d	0.64	0.43	0.41	0.63	0.57	1.69	0.94	0.58	1.05	1.23
	x	0.10	0.10	0.20	-0.20	-0.10	0.40	-0.70	0.00	-0.20	-0.20
	y	-0.60	-0.42	-0.30	-0.60	-0.39	-1.10	0.60	0.30	-0.90	0.18
	z	-0.20	0.00	-0.20	0.00	0.40	1.22	0.20	0.50	-0.50	-1.20
Wrist	d	0.34	0.18	0.28	0.55	0.81	0.48	0.45	1.42	0.74	1.84
	x	-0.10	0.10	0.00	-0.20	0.20	0.10	0.10	0.20	0.30	-1.10
	y	-0.18	-0.04	-0.22	0.49	-0.49	-0.26	-0.35	0.06	-0.66	0.59
	z	-0.27	-0.14	-0.16	-0.14	-0.61	0.39	-0.27	-1.40	0.16	1.36
Arm	d	0.77	0.68	0.88	0.83	2.22	1.80	1.13	3.32	1.11	2.49
	x	0.60	-0.50	-0.80	-0.20	0.70	-0.30	0.40	-1.40	0.10	-0.40
	y	0.48	-0.33	-0.20	-0.80	1.90	0.33	-0.21	-2.35	0.00	-1.22
	z	-0.06	0.32	0.30	-0.10	0.91	-1.74	1.04	1.88	-1.11	2.13

\*d: distance; x, y, z: the errors along the 3 axes;  $d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

\*\*unit: mm

## 5.7.6 トルクに関する評価実験

### 5.7.6.1 関節トルクの推定

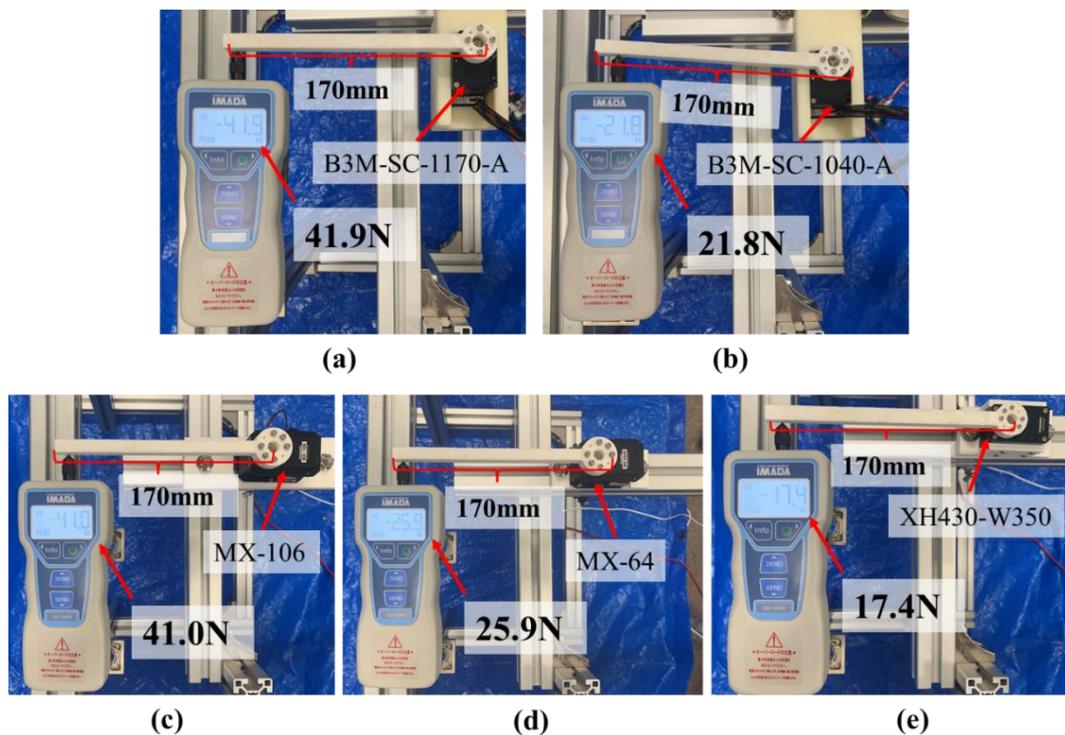


Fig. 5-47. Test motor torque. (a) Motors used in the shoulder and elbow joints of the robot arm A type. (b) Motors used in the wrist joint of the robot arm A type. (c) Motors used in the shoulder joint of the robot arm B type. (d) Motors used in the elbow joint of the robot arm B type. (e) Motors used in the wrist joint of the robot arm B type.

本論文のロボットアームの駆動は干渉駆動である。そのため、試験中のある関節が外力を受けて静止するとき、他の関節にはたわみが生じ測定結果も不正確になってしまう。消費電流の実験によると、関節内のモーターの消費電流は、直接駆動するモーターの消費電流に比例することがわかる。したがって、モーターの最大トルクを測定することによりロボットアームにある各関節の理論上の最大トルク（表 5-4）を推計することができる。

Table 5-4. Estimated joint torque according to motor torque

Motor (Measured torque) Kondo Kagaku CO.,LTD	Robot arm A type		Motor (Measured torque) ROBOTIS CO.,LTD	Robot arm B type	
B3M-SC- 1170-A 7.1Nm	Joint 1	21.3Nm	MX-106 7.0Nm	Joint 1	42Nm
	Joint 2	21.3Nm		Joint 2	21Nm
	Joint 3	14.2Nm		Joint 3	21Nm
	Joint 4	14.2Nm	MX-64 4.4Nm	Joint 4	17.6Nm
	Joint 5	14.2Nm		Joint 5	8.8Nm
B3M-SC- 1040-A 3.7Nm	Joint 6	7.4 Nm	XH430- W350 3.0Nm	Joint 6	7.6Nm
	Joint 7	7.4Nm		Joint 7	7.6Nm

### 5.7.6.2 最大負荷

本節ではロボットアーム-A タイプとロボットアーム-B タイプの最大負荷を調べた。まず、ロボットアームを地面に垂直な方向から図 5-48 に示された位置に移動させ、ロボットアームが取り付けられる最大重量を調べた。その結果、ロボットアーム-A タイプの前方挙上と側方挙上の有効最大負荷は 1.5kg であることが分かった (図 5-48)。ここでロボットアーム-B タイプについて、肩関節屈曲 (前方挙上) の耐荷重はロボットアームの実用性に影響を与えるため、この自由度の最大負荷を上げたいと考えた。さまざまな干渉方法を使用した後、肩関節屈曲 (前方挙上) の最大負荷を大きくした。図 5-48 (b) と (c) は、それぞれロボットアーム-B タイプの前方挙上と側方挙上の有効最大荷重実験である。前方挙上の有効最大荷重は 2.5kg (図 5-48b) で、側方挙上の有効最大荷重は 1.5kg (図 5-48c) である。

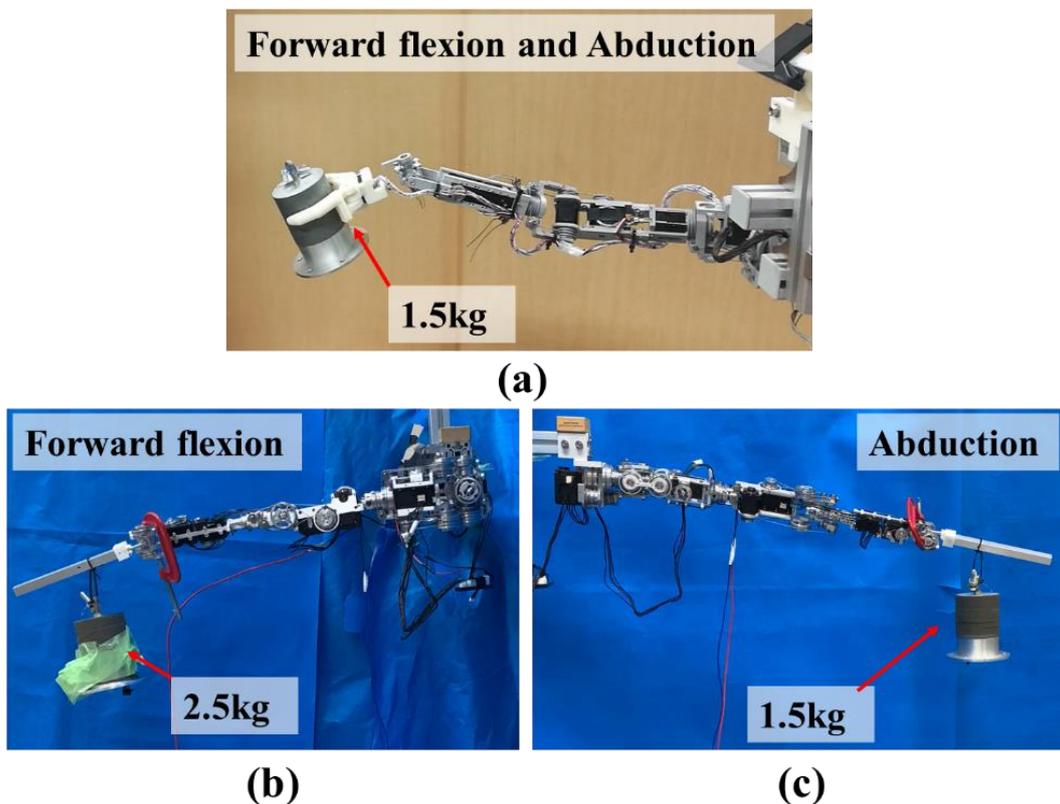


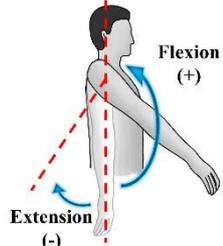
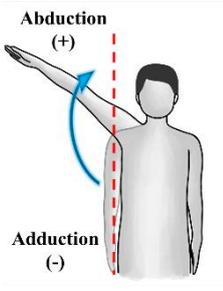
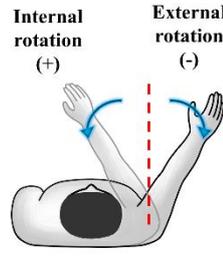
Fig. 5-48. (a) Maximum load for forwarding flexion and abduction of the robotic arm A type. (b) Maximum load for forwarding flexion of the robotic arm B type. (c) Maximum load for abduction of the robotic arm B type.

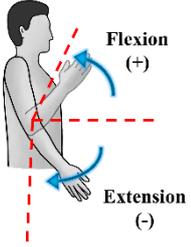
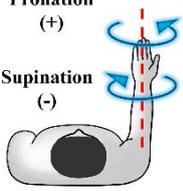
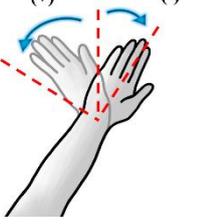
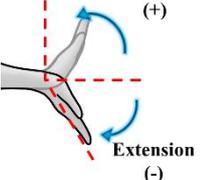
## 5.8 まとめ

### 5.8.1 ロボットアームの仕様

ロボットアーム Aタイプとロボットアーム Bタイプの可動域

Table 5-5. The movable range of the joint

Joint	Movement direction	Movable range of human arm	Movable range of robot arm A type	Movable range of robot arm B type	Reference Figure
Shoulder	Flexion	180°	270°	230°	 <p>Flexion (+) Extension (-)</p> <p>Joint 1</p>
	Extension	50°	270°	230°	
	Abduction	180°	195°	220°	 <p>Abduction (+) Adduction (-)</p> <p>Joint 2</p>
	Adduction	0°	-15°	50°	
	Internal rotation	80°	270°	180°	 <p>Internal rotation (+) External rotation (-)</p> <p>Joint 3</p>
	External rotation	60°	270°	180°	

elbow	Flexion	55°	60°	60°	 <p>Flexion (+) Extension (-)</p> <p>Joint 4</p>
	Extension	95°	130°	150°	
forearm	Pronation	90°	270°	180°	 <p>Pronation (+) Supination (-)</p> <p>Joint 5</p>
	Supination	90°	270°	180°	
wrist	Ulnar deviation	55°	90°	55°	 <p>Ulnar deviation (+)      Radial deviation (-)</p> <p>Joint 6</p>
	Radial deviation	25°	90°	55°	
	Flexion	90°	90°	90°	 <p>Flexion (+) Extension (-)</p> <p>Joint 7</p>
	Extension	70°	90°	90°	

ロボットアーム A タイプとロボットアーム B タイプの仕様

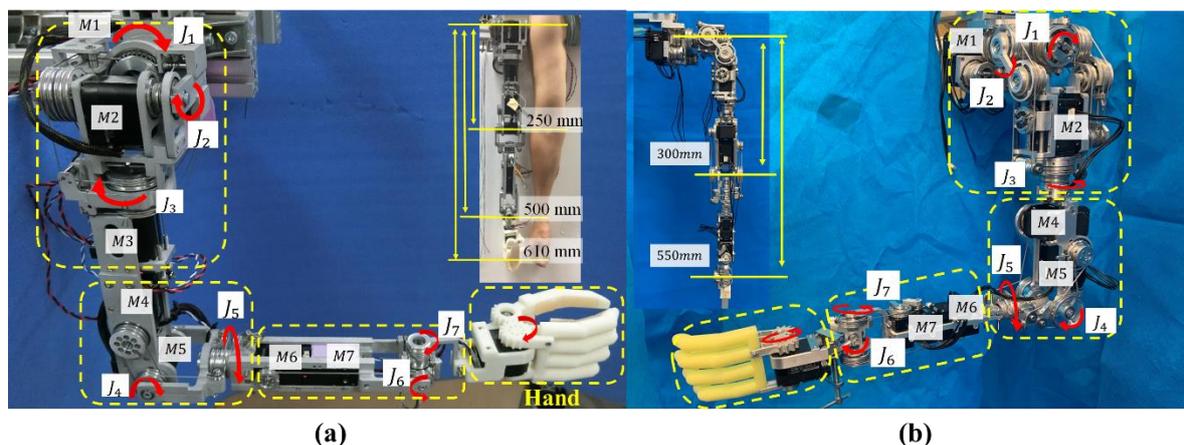


Fig. 5-49. Overall picture of the robot arm (a) robot arm A type. (b) robot arm B type.

Table 5-6. Specification

Robot arm		Robot arm A type	Robot arm B type	
Weight		2.2kg	2.57kg	
Length (Without hands)		610mm(500mm)	660mm(550mm)	
Payload		1.5kg	2.5kg	
controllable axes		7	7	
Max. speed (No load)	Shoulder	Joint 1	23rpm	22rpm
		Joint 2	23rpm	22rpm
		Joint 3	23rpm	22rpm
	Elbow	Joint 4	46rpm	32rpm
		Joint 5	46rpm	63rpm
	Wrist	Joint 6	54rpm	23.6rpm
		Joint 7	54rpm	23.6rpm

Max. Allowable Dynamic Torque/ Max. Allowable Static Torque	Shoulder	Joint 1	21.3Nm/ 22.8Nm	42 Nm/ 50.4Nm
		Joint 2	21.3Nm/ 22.8Nm	21Nm/ 25.2Nm
		Joint 3	14.2Nm/ 15.2Nm	21Nm/ 25.2Nm
	Elbow	Joint 4	14.2Nm/ 15.2Nm	17.6Nm/ 24Nm
		Joint 5	14.2Nm/ 15.2Nm	8.8Nm/ 12Nm
	Wrist	Joint 6	7.4 Nm/ 9.2Nm	7.6Nm/ 8.6Nm
		Joint 7	7.4 Nm/ 9.2Nm	7.6Nm/ 8.6Nm
Motor	Shoulder	B3M-SC-1170-A	MX-106	
	Elbow	B3M-SC-1170-A	MX-64	
	Wrist	B3M-SC-1040-A	XH430-W350	
Wire	Shoulder	SUS304, $\phi$ 1.05mm (7*19)	SUS304, $\phi$ 1.35mm (7*7*7)	
		SUS304, $\phi$ 1.05mm (7*19)	SUS304, $\phi$ 1.35mm (7*7*7)	
	Wrist	SUS304, $\phi$ 0.75mm (7*19)	SUS304, $\phi$ 1.00mm (7*7*7)	
Structural materials		Aluminum alloy 2017A	Aluminum alloy 2017A	
power supply		12V	12V	
control system		FGPA and STM32	In development	
Operating System (OS)		Ubuntu Linux-ROS	In development	

## 5.8.2 ロボットアームの考察

Table 5-7. Comparison of robot arms

No.	Name	DOFs/ Actuators	Transmission mechanism	Weight (kg)	Payload (kg)	Payload/Weight
(1)	LWR III	7/7	Harmonic gear	14.0	14.0	1.00
(B)	Robot arm B type	7/7	Tendon	2.57	2.5	0.97
(A)	Robot arm A type	7/7	Tendon	2.2	1.5	0.68
(2)	KINOVA Gen3	7/7	Tendon	8.3	4.5	0.54
(3)	LIMS	7/7	Direct drive	5.5	2.9	0.53
(4)	LWA 4P	6/6	Harmonic gear	12.5	6.0	0.48
(5)	Y. Tsumaki et al.	7/8	Tendon	2.9	1.5	0.52
(6)	LBR iiwa7R800 7	7/7	Harmonic gear	22.3	7.0	0.31
(7)	UR5	6/6	Harmonic gear	18.4	5.0	0.27
(8)	VS-6577G-B	6/6	Harmonic gear	36.0	7.0	0.19
(9)	M. Quigley et al.	7/7	Harmonic gear	11.4	2.0	0.18
(10)	SIA5F	7/7	Harmonic gear	30.0	5.0	0.17
(11)	MIA	7/14	Harmonic gear	25.0	3.0	0.12
(12)	KR Agilus 6 R700	6/6	Harmonic gear	50.0	6.0	0.12
(13)	WAM Arm	7/7	Tendon	27.0	3.0	0.11
(14)	LWH	8/8	Tendon	3.5	0.3	0.09

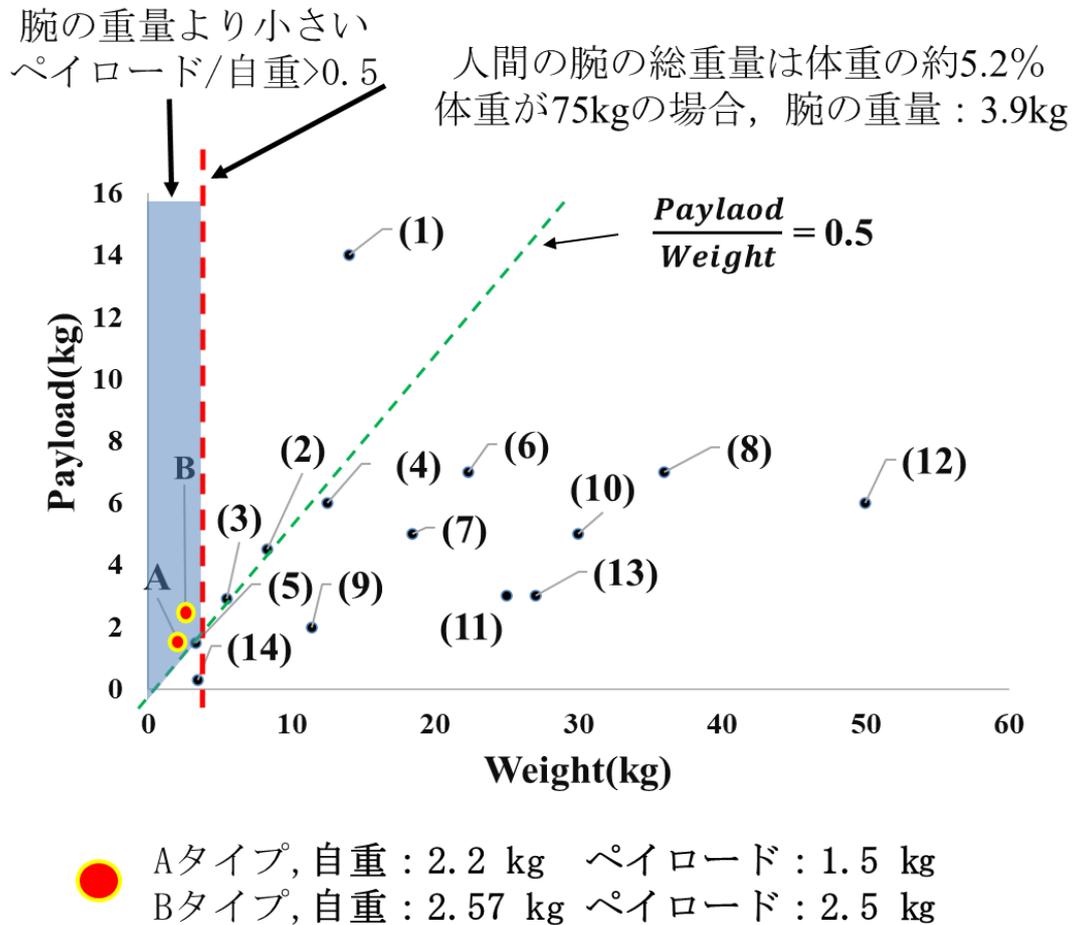


Fig. 5-50. Comparison of robot arms.

提案したワイヤ干渉駆動のモジュールを用いて、2自由度の手首関節、2自由度の肘関節、3自由度の肩関節を開発し、これら組み合わせることで、二つの人型ロボットアームを開発した。それぞれの自重は2.2kgと2.57kgでありながら、最大ペイロードは1.5kgと2.5kgである。(図5-50)をみると、高出力と低重量を両立できており、同機能で世界一の軽量性を実現した。

## 第6章 結論と展望

---

6.1 結論.....	192
6.2 展望.....	195

---

## 6.1 結論

現在、ロボットは人間の生活に入り込み、人々との相互作用や密接な接触がますます増えている。ロボットを利用して高齢者や身体不自由者の世話をすることで、将来の介護労働者不足の問題の解決が期待できる。遠隔操作により、高齢者や身体不自由者への迅速な支援も可能になる。このようなロボットには優れたロボットアームが必要である。このロボットアームをもってこそ、ロボットは人間に代わったり、または人間を支援したりして作業を完了することができる。このようなロボットアームには、軽量性、高出力が求められる。同時に、人と接する際のロボットアームの不慣れを軽減し、遠隔操作中のロボットアームと人間の動きの不一致の危険を回避するため、または、患者に直接取り付けられるため、このようなロボットアームは人間と同じ運動学を備える必要がある。ロボットアームに、軽量、高出力、複数の自由度、耐久性、安全性、精度を同時に持たせることは依然として大きな課題である。

本論文ではワイヤ干渉駆動に基づき、軽量、高出力を図る新たな駆動方式を提案した。この駆動方式を用いて車椅子や歩行器と組み合わせたり、または患者に取り付けたりすることが可能な、ヒトの運動学を再現した安全性と汎用性の高いロボットアームを開発した。軽量のため、ワイヤ駆動を採用した。高出力を実現するために大きいモーターを使わず、ワイヤを介してモーターの出力を干渉させた駆動方式を採用した。ワイヤの破断や弛みによる耐久性、安全性と精度の課題を解決するためにオリジナルの関節モジュールを開発し、モジュールを組み合わせることで多自由度のアームを実現する方法を提案した。

### ワイヤ干渉駆動のモジュール化の開発における成果

本論文のワイヤ干渉駆動モジュールでは、ワイヤを介したモーターの出力の再配分によりモーターのサイズと数を変えずに関節の出力トルクを高められた。このとき、2 モーター2 自由度干渉駆動モジュールと 3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールを開発した。

2 モーター2 自由度干渉駆動モジュールは、関節プーリーの位置、サイズおよびワイヤルーティング方法を通じて 2 自由度のすべての可能性を説明し、その実用性、干渉駆動として機能しているかどうかを解析した。干渉駆動の利点を得られたルーティング形式では、モーターの位置によって引き起こされるパフォーマンスの違いについて説明した。説明したルーティング形式はモーターの回転軸と関節の回転軸の位置関係によって分類された、2 モーター外付け機構、2 モーター内蔵同軸機構、1 モーター外付け機構、2 モーター内蔵異軸機構の 4 種類である。

人体の関節のほとんどは 2 自由度と 3 自由度の関節で構成されている。2 自由度の干渉関節は広く研究されているが、人間の 3 自由度の関節を模倣できる干渉駆動は現にない。3 モーターの干渉は、ワイヤのルーティング方法によって異なる干渉結果が得られるため、本節は主に 3 モーター干渉の原理に焦点を当て、実現可能なすべての機構を分類する。3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールは、主に関節プーリー数により、可能な 3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールすべてを分類し、各タイプの特性と違いを解析した。3 モーター3 自由度干渉駆動モジュールのワイヤルーティング形式は 4 つあり、それぞれ Fully-Routed Motor-Joint 形式、1-Unrouted Motor-Joint 形式、2-Unrouted Motor-Joint 形式、3-Unrouted Motor-Joint 形式と呼ぶ。また、ワイヤのルーティング方法、トルク関係式及びモーター角度と関節角度の関係を中心に各機構を解析・比較した。

### ワイヤ駆動における成果

ワイヤ張力調整機構と干渉および非干渉の問題は、ワイヤ伝動において避けられない問題である。ワイヤ張力調整機構：本論文では中空ねじ式、メカロックまたワンウェイクラッチ式、プーリー式の 3 種のワイヤ張力調整機構を実現し、それぞれの長所と短所を詳しく説明した。干渉と非干渉：本論文ではいくつかの解決策を提案し、各解決策の実現可能性について解析した。最後、2-DoF ローリングジョイントをロボットアームに応用し、干渉と非干渉の共存問題を解決した。

## 人型ロボットアームの開発における成果

肩関節に 3M3D, 肘および手首関節に 2M2D のワイヤ干渉駆動モジュールを用いて 2 つの 7 自由度の擬人化ロボットアームを開発した。関節の動き方は人と同じで, 可動域は人の腕の可動域をカバーしている。2 つのロボットアームはそれぞれロボットアーム-A タイプとロボットアーム-B タイプと呼ぶ。ロボットアーム-A タイプの自重は 2.2kg で, 有効最大負荷は 1.5 kg だが, 制御精度はそれほど高くなかった。その後にはロボットアーム-B タイプを開発し, 2 つの大きな改善を行った。1, 別のワイヤルーティング方法を使用することで肩関節のトルクを再配分し, ロボットアームの重要な関節のトルクを大きくした。2, 機構を再設計し, 部品間の隙間による機械誤差を解決した。ロボットアーム-B タイプの有効最大負荷は 2.5kg で, 自重はわずか 2.57kg である。A タイプと B タイプのロボットアームは人の腕の平均重量より軽く, 同性能のロボットアームの中では世界最軽量である。従来のワイヤ駆動ロボットアームと異なり, モーター内蔵であることから既存の機器に装着し易く, 汎用性が高い。

## 6.2 展望

ワイヤ干渉駆動は研究意義のある課題である。今後の研究によって、ワイヤ干渉駆動ロボットアームの性能をさらに向上させたい。また、ワイヤ干渉駆動モジュールで人間と同じ運動学を持ち、軽量・高出力・高制御精度と知能化の上半身ロボットの開発を実現したい。この目標を実現するため、将来の作業について以下の3点にまとめる。

### ▶ ワイヤ駆動ロボットの精度の向上と知能化の実現

ワイヤ駆動について、自重及び把持物体の重量によるワイヤの伸縮は動作精度低下の最大の要因であり、動作精度を向上させるにはワイヤに掛かっている張力を計測する必要がある。また、ヒトと触れあい、ヒトを補助するロボットとしては、環境に基づいて自律的に動作し、安全を確保しながらタスクを達成する知能が必要である。そのため、環境及びロボット自身の状態を把握することが不可欠である。

知能化について、ヒトと作用し合い、ヒトを補助するロボットアームとしては、環境に基づいて自律的に動作し、安全を確保しながらタスクを達成する知能が必要である。このような知能を実現するには、環境及びロボットアーム自身の状態を把握することが不可欠である。

ヒトが動作している際の感覚運動系を規範としてワイヤ干渉駆動モジュールに固有覚を付与することで、制御精度と知能化の課題を解決することに着想した。

固有覚は体に対する意識（肢体の位置、姿勢、負荷など）を筋、腱

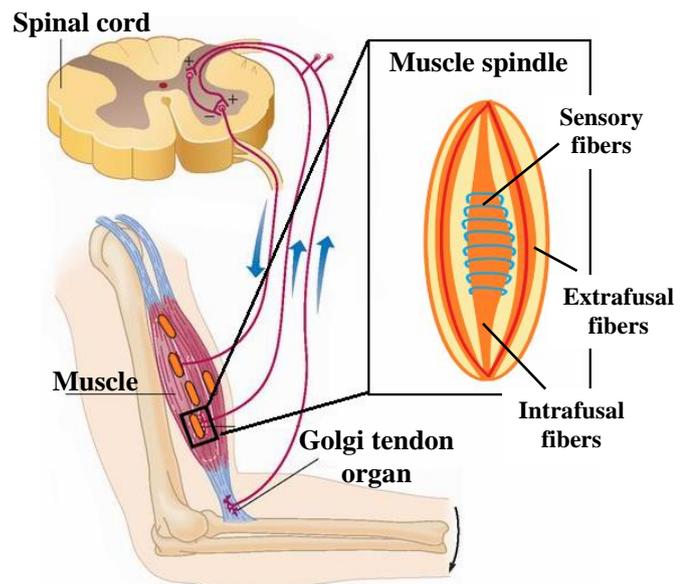


Fig. 6-1. The proprioception of the human body

内の受容器による筋、腱の緊張の変化の知覚である（図 6-1）。普段意識されないが、ヒトが大きく依存する感覚である。視覚と触覚は運動機能と独立しているため別々に開発することができるが、固有覚は運動機能と直接関係するため、駆動系と一体的に開発する必要がある。ワイヤ駆動の場合、ワイヤそのものは筋腱に相当するため、ワイヤの経路上にセンサーを取り付けることで固有覚を付与できる。さらに、視覚、触覚、固有覚を統合することで制御精度と知能化の課題の解決に挑む。

### ▶ 人間の上半身と同じ自由度の人型ロボットの構築

主に人間の上半身の運動学と同じロボットを実現する。軽量、高出力のため、すべてワイヤ干渉駆動関節モジュールを利用する。ロボット本体を首、腰、肩、肘、手首関節に分け、人間の上半身の動きをシミュレートする。首関節、腰関節、肩関節は本論文で開発した 3M3D ワイヤ干渉駆動関節モジュールを使用し、肘関節と手首関節は 2M2D ワイヤ干渉駆動関節モジュールを使用する(図 6-2)。

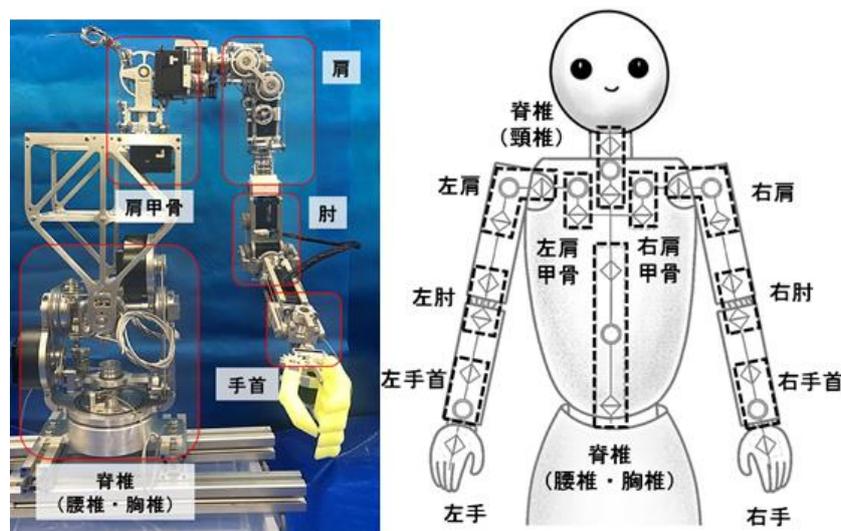


Fig. 6-2. Upper body humanoid robot

関節と手はまだ完成しておらず、2つの部分もワイヤ干渉駆動を利用する。十分な自由度を確保すると同時に、関節の自重を軽減し、ロボットの重心をできるだけ低くするため、首関節は 3M3D ワイヤ干渉駆動を利用し、モーターを外付けにする。また、軽い自重、大きな出力およびより多い自由度を持たせるため、手では干渉劣駆動を利用する予定である。

- マルチモーダル感覚情報（固有覚，視覚，触覚）の融合と並列制御システムの開発

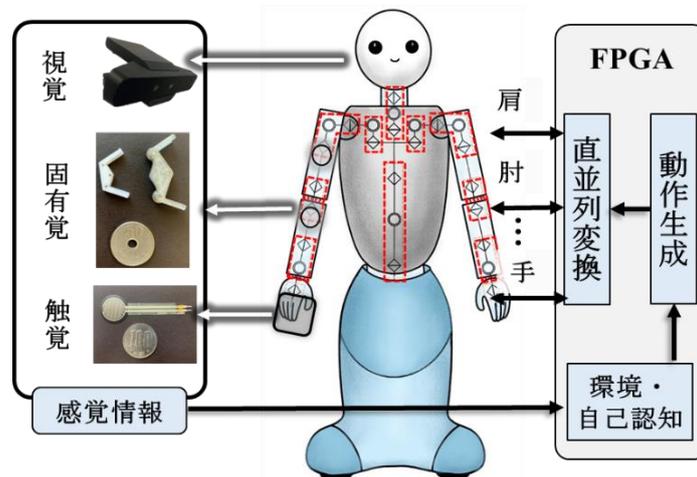


Fig. 6-3. Development of a system integrating sensory and parallel control.

ヒトの感覚の内，特に運動との関連が深い視覚，触覚，固有覚はそれぞれのセンシング領域，精度，感度などが異なり，互いに補うことでヒトの巧みな動作に必要な情報を提供している．本論文では同じ機能を人型ロボットに付与するために RGBD カメラで環境と物体認識を行う視覚，柔軟な圧力センサーで物体把持とインタラクションの際の力を検知する触覚，およびワイヤ張力で実現される固有覚を融合したマルチモーダル感覚情報を融合した感覚系を開発する．複数のモーター，複数のセンサーの同期性とリアルタイム性を確保するため，FPGA（フィールドプログラマブルゲートアレイ）を介して並列制御を実現する．

期待される結果と影響：

本研究は，上半身の動作を完全に再現でき，高い安全性と知能を持つロボットの実現を目指す．固有覚の導入により，人間の筋骨格系の感覚を模倣し，ワイヤの張力によって，関節角度，姿勢，負荷，自重などに対するロボットの自己認知を実現できる．開発される人型ロボットは，使用性と汎用性も高く，福祉介護分野に幅広く応用できる．また，研究のプラットフォームとして，医工連携による身体機能の拡張やヒューマン・ロボット・インターフェースの研究にも貢献できる．



# 謝辭

本論文は、著者が電気通信大学大学院 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻において、博士後期課程の期間に行った研究をまとめたものです。本論文の遂行にあたり多くの方々にご指導，ご協力いただきました。

著者の主指導教員であり，多大なるご指導を賜りました

電気通信大学 脳・医工学研究センター  
姜銀来 准教授

先生にお会いすることができて，もっともの光栄だと思います。先生の指導がなければ，私はきっと普通のままで，今のような研究成果が出せなく，今の自分まで成長できなくなると思います。私の指導教員として，修士二年と博士三年間，よく成功できる方法を教えてくださったり，正しい道を導いてくださったりしました。普段，研究に対する私の考え方をいつも丁寧に指摘してくださったり，英語と日本語の修正もよくしてくださったりして，とてもありがたく思います。先生から，いかにして優秀な研究者になることを教わりました。いつも無口な私ですが，先生のことをずっと肝に銘じ，心から感謝しております。

電気通信大学・大学院共同サステナビリティ研究専攻  
電気通信大学大学院 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻  
横井 浩史 教授

研究においては独創的なアイデア，適切な助言をいただき，また本論文の関連分野のみならず広い範囲の知識，知見について教えていただきました。先生のご指導を，5年間を自分の人生に大きな一歩となり，貴重な経験として重宝させていただきます。誠にありがとうございました。

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻  
青山 尚之 教授

大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻  
東郷 俊太 准教授

研究を進めるにあたって様々なご指導, 助言をいただきました. 心から感謝します.

機械知能システム学専攻 矢吹 佳子 研究員には, 研究活動に使った機材の購入手続きや学会出張の書類の作成などたくさんの方で手伝って頂きました. そのお陰で研究を円滑に進めることができたと思います. また, 日本での生活に困った事や理解できなかったことなどについて熱心に相談に乗って頂き, 大変お世話になりました. こういった事務手続きの面でも, 生活の面でも, とても大きなご協力をいただき, 心から深く感謝いたします.

同じ研究室で博論を執筆している妻の王菲には, あなたの支持と助けがあって, 学業を完成するための原動力である. お疲れ様でした.

さらに, 本論文におけるロボットアームのハードウェアについて共同研究・開発いたしました

瀋陽工業大学 白殿春 先生  
上海交通大学 朱笑笑 先生

には, 心からお礼申し上げます. 瀋陽への海外出張で不安な著者を快く歓迎くださりまして, ありがとうございます. 先生方のご協力がなければ, 本論文のロボットアームを開発することができません.

横井研究室の陳鵬君から, ロボットアームの開発に対してアドバイスもいただきました. 実験の際にも, ご協力をいただき, ありがとうございます.

本論文室の王軼煒君には, 図表の作成, 寸法の測定実験の手伝いなどにおいて, 多大な助力になりました. ありがとうございます.

本論文室の内田涼介君, 東直希君, 中村哲君には, 博論日本語を校閲していただき, ありがとうございます.

研究室の先輩には, 経験と多様なアドバイスをして頂き, ありがとうございます. 同期の皆さんには, 日々の切磋琢磨の中に成長させて頂き, ありがとうございます. 後輩の皆さんには, 実験の手伝いをして頂き, ありがとうございます.

最後に、日本に留学の間に私をずっと支えてくれた、辛労を尽くす両親に対し、心から感謝いたします。ありがとうございました。

本論文の一部は日本学術振興会、科学研究費補助金（特別研究員奨励費）により行われました。記して謝意を表します。

2022 年

## 参考文献

- [1] 内閣府, “高齢化の状況”, 令和3年版高齢社会白書 (全体版) .
- [2] 国家统计局, “第七次全国人口普查主要数据情况, 2021, 05.” [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202105/t20210510\\_1817176.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202105/t20210510_1817176.html) (accessed Oct. 18, 2021).
- [3] 厚生労働省, “厚生労働省社会・援護局障害保健福祉部企画課: ‘平成18年度身体障害者児・実態調査結果’, 厚生労働省報道発表資料, 2008.”
- [4] 長谷川 良平, “ブレインマシンインターフェースの現状と将来”, 電子情報通信学会誌, Vol.91, No.12, pp.1066–1075, 2008”.
- [5] 機械システム振興協会, “次世代ロボット技術(RT)の環境構造化に関する調査研究報告書(要旨),” p. 57.
- [6] Ishiguro H., “Studies on Humanoids,” *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, vol. 76, no. 1, pp. 20–23, 2010, doi: 10.2493/jjspe.76.20.
- [7] R. F. Chandler, C. E. Clauser, J. T. McConville, H. M. Reardon, J., “Investigation of Inertial Properties of the Human Body,” Mar. 1975.
- [8] A. M. S. F. Carvalho and J. A. T. Machado, “A biomechanical perspective for the kinematic analysis of robot manipulators,” *SAMS*, vol. 36, pp. 471–484, 2000.
- [9] T. Sobh and X. Xiong, Eds., *Prototyping of Robotic Systems: Applications of Design and Implementation*. IGI Global, 2012. doi: 10.4018/978-1-4666-0176-5.
- [10] J. Vogel, C. Castellini, and P. van der Smagt, “EMG-based teleoperation and manipulation with the DLR LWR-III,” in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sep. 2011, pp. 672–678. doi: 10.1109/IROS.2011.6094739.
- [11] “User Guide: KINOVA Gen2 ultra lightweight robot, Kinova Inc., 2019,” *Kinova robotics*. <https://www.kinovarobotics.com/assistive-robotics/products/robot-arms/%2523ultra-lightweight-robotic-arms-at-your-service> (accessed Oct. 18, 2021).
- [12] Y. Kim, “Design of low inertia manipulator with high stiffness and strength using tension amplifying mechanisms,” in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sep. 2015, pp. 5850–5856. doi: 10.1109/IROS.2015.7354208.
- [13] A. Rodić, B. Miloradović, S. Popić, and Đ. Urukalo, “On Developing Lightweight Robot-Arm of Anthropomorphic Characteristics,” in *New Trends in Medical and Service Robots*, vol. 38, H. Bleuler, M. Bouri, F. Mondada, D. Pislá, A. Rodić, and P. Helmer, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 33–46. doi: 10.1007/978-3-319-23832-6\_4.
- [14] Y. Tsumaki, Y. Suzuki, N. Sasaki, E. Obara, and S. Kanazawa, “A 7-Dof Wire-Driven Lightweight Arm with Wide Wrist Motion Range,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Oct. 2018, pp. 1–9. doi: 10.1109/IROS.2018.8593515.

- [15] M. Quigley, A. Asbeck, and A. Ng, "A low-cost compliant 7-DOF robotic manipulator," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2011, pp. 6051–6058. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980332.
- [16] Morita T., Tomita N., Ueda T., and Sugano S., "Development of Force-Controlled Robot Arm Using Mechanical Impedance Adjuster.," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 16, no. 7, pp. 1001–1006, 1998, doi: 10.7210/jrsj.16.1001.
- [17] "WAM arm User's Guide, Barrett Technology®, 2006, [http://www.me.unm.edu/~starr/research/WAM\\_UsersGuide\\_AE-00.pdf](http://www.me.unm.edu/~starr/research/WAM_UsersGuide_AE-00.pdf)."
- [18] H. Yang, Y. Yan, S. Su, Z. Dong, and S. H. Ul Hassan, "LWH-Arm: A Prototype of 8-DoF Lightweight Humanoid Robot Arm," in *2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS)*, Jun. 2019, pp. 6–10. doi: 10.1109/ICRAS.2019.8809073.
- [19] "A. Rahman, A. H. Khan, T. Ahmed, and M. Sajjad, 'Design, analysis and implementation of a robotic arm- the animator,' *American Journal of Engineering Research*, vol. 2, no. 10, pp. 298–307, 2013."
- [20] D. A. Bennett, J. E. Mitchell, D. Truex, and M. Goldfarb, "Design of a Myoelectric Transhumeral Prosthesis," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1868–1879, Aug. 2016, doi: 10.1109/TMECH.2016.2552999.
- [21] K. Kawashima, T. Sasaki, A. Ohkubo, T. Miyata, and T. Kagawa, "Application of robot arm using fiber knitted type pneumatic artificial rubber muscles," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, Apr. 2004, vol. 5, pp. 4937–4942 Vol.5. doi: 10.1109/ROBOT.2004.1302500.
- [22] H. Miwa, K. Itoh, D. Ito, H. Takanobu, and A. Takanishi, "Design and control of 9-DOFs emotion expression humanoid arm," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, Apr. 2004, vol. 1, pp. 128–133 Vol.1. doi: 10.1109/ROBOT.2004.1307140.
- [23] G. Metta, G. Sandini, D. Vernon, L. Natale, and F. Nori, "The iCub Humanoid Robot: An Open Platform for Research in Embodied Cognition," in *Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, New York, NY, USA, 2008, pp. 50–56. doi: 10.1145/1774674.1774683.
- [24] H. Kim and J. Song, "Multi-DOF Counterbalance Mechanism for a Service Robot Arm," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 6, pp. 1756–1763, Dec. 2014, doi: 10.1109/TMECH.2014.2308312.
- [25] B. Tondu, S. Ippolito, J. Guiochet, and A. Daidie, "A Seven-degrees-of-freedom Robot-arm Driven by Pneumatic Artificial Muscles for Humanoid Robots," *The International*

- Journal of Robotics Research*, vol. 24, no. 4, pp. 257–274, Apr. 2005, doi: 10.1177/0278364905052437.
- [26] C. Richter *et al.*, “Musculoskeletal Robots: Scalability in Neural Control,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 23, no. 4, pp. 128–137, Dec. 2016, doi: 10.1109/MRA.2016.2535081.
- [27] M. Sekine, K. Shiota, K. Kita, A. Namiki, and W. Yu, “A lightweight shoulder prosthesis with antagonistic impact-absorbing hybrid actuation for bimanual activities of daily living,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 4, p. 168781401664598, Apr. 2016, doi: 10.1177/1687814016645982.
- [28] H. Nakamoto and N. Matsuhira, “Development of an arm for collaborative robot equipped with gravity compensation mechanism according to payload,” in *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Jul. 2017, pp. 40–45. doi: 10.1109/AIM.2017.8013992.
- [29] K.-H. Ahn, W.-B. Lee, and J.-B. Song, “Reduction in gravitational torques of an industrial robot equipped with 2 DOF passive counterbalance mechanisms,” in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Oct. 2016, pp. 4344–4349. doi: 10.1109/IROS.2016.7759639.
- [30] Hirose S. and Ma S., “Development of Tendon Driven Multi-Joint Manipulator Based on Coupled Drive,” *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol. 26, no. 11, pp. 1291–1298, 1990, doi: 10.9746/sicetr1965.26.1291.
- [31] Y. Kim, “Anthropomorphic Low-Inertia High-Stiffness Manipulator for High-Speed Safe Interaction,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 6, pp. 1358–1374, Dec. 2017, doi: 10.1109/TRO.2017.2732354.
- [32] A. Horigome, H. Yamada, G. Endo, S. Sen, S. Hirose, and E. F. Fukushima, “Development of a coupled tendon-driven 3D multi-joint manipulator,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2014, pp. 5915–5920. doi: 10.1109/ICRA.2014.6907730.
- [33] 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*, vol. 59, no. 558, pp. 458–465, 1993.

## 研究業績

## 関連論文・学術雑誌論文

- [1] Wenyang Li, Peng Chen, Dianchun Bai, Xiaoxiao Zhu, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, and Yinlai Jiang, “Modularization of 2- and 3-DoF Coupled Tendon-Driven Joints,” IEEE Transactions on Robotics, vol. 37, no. 3, pp. 905–917, Jun. 2021, doi: 10.1109/TRO.2020.3038687.
- [2] Wenyang Li, Yiwei Wang, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, and Yinlai Jiang, “Development of a Humanoid Shoulder Based on 3-Motor 3 Degrees-of-Freedom Coupled Tendon-Driven Joint Module,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pp. 1105–1111, Apr. 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3056376.
- [3] 姜銀来, 李文揚, 陳鵬, 東郷俊太, 横井浩史, モジュール化したワイヤ干渉駆動型ヒューマノイド・ロボットアーム, 日本ロボット学会誌, Vol.38, No.7, pp.657-666, 2020年9月. doi: 10.7210/jrsj.38.657

## 関連論文・国際会議論文

- [4] Wenyang Li, Peng Chen, Dianchun Bai, Xiaoxiao Zhu, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, and Yinlai Jiang, “Design of a 2 Motor 2 Degrees-of-Freedom Coupled Tendon-driven Joint Module,” in 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 943–948, Oct. 2018.
- [5] Wenyang Li, Peng Chen, Yinlai Jiang, Dianchun Bai, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, “Structure Design of a Tendon-driven Robotic Arm Considering Safety and Durability,” in 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR), pp. 71–76, Aug. 2018.

## 関連論文・国内会議論文

- [6] 李文揚, 陳鵬, 矢吹佳子, 姜銀来, 横井浩史, 東郷俊太: “ワイヤ干渉駆動関節モジュールの分類と比較,” 第36回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2018AC1A3-02, 2018年9月.
- [7] 李文揚, 姜銀来, 陳鵬, 東郷俊太, 横井浩史, “3自由度干渉駆動関節モジュールの解析” ” 第37回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2019AC1I1-08, 2019年9月 .

## 参考論文・学術雑誌論文

- [1] Yiwei Wang, Wenyang Li, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, and Yinlai Jiang, “Survey on Main Drive Methods Used in Humanoid Robotic Upper Limbs,” *Cyborg and Bionic Systems*, vol. 2021, pp. 1–12, Jun. 2021, doi: 10.34133/2021/9817487.

## 解説記事

- [2] 姜銀来, 李文揚, 王軼煒, 東郷俊太, 横井浩史, ワイヤ干渉駆動とそのモジュール化設計, *日本ロボット学会誌*. Vol.39, No.9, pp.803-806, 2021年. doi: <https://doi.org/10.7210/jrsj.39.803>

## 参考論文・国際会議論文

- [3] Yiwei Wang, Wenyang Li, Tongyang Cao, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, Jiang Yinlai, “A 3-DOF Bionic Waist Joint for Humanoid Robot,” *43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*, 2021. (Accepted)
- [4] Zhenyu Sun, Wenyang Li, Xiaobei Jing, Xu Yong, Yinlai Jiang and Hiroshi Yokoi, “Inverse Kinematics and Master-Slave Control for a 7-DoF Tendon-Driven Humanoid Robot Arm,” *2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*, No.315, July 2021.
- [5] Wenyang Li, Yiwei Wang, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, and Jiang Yinlai, “Development of a Humanoid Shoulder Based on 3-Motor 3 Degrees-of-Freedom Coupled Tendon-Driven Joint Module,” *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6912–6918, June 2021. (IEEE RA-L with ICRA presentation option).
- [6] Yiwei Wang, Wenyang Li, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, and Yinlai Jiang, “Design of a 3-DOF Coupled Tendon-Driven Waist Joint,” *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 7046–7051, June. 2021.
- [7] Tomohiro Shimizu, Wenyang Li, Peng Chen, Yinlai Jiang, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, “Toward Automatic Tuning of Tendon-driven Mechanisms: Vibration based Detection of Tendon Tension,” in *2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR)*, pp. 389–394, Aug. 2018.
- [8] Peng Chen, Wenyang Li, Yinlai Jiang, Dianchun Bai, xiaoxiao zhu, Shunta Togo, Hiroshi Yokoi, “Safety Control for Robotic Arm in Narrow Space Based on Distance Sensor,” in *2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR)*, pp. 66–70, Aug. 2018

## 受賞

日中科学技術交流協会2021年度中国人留学生研究奨励賞

三浦賞，日本機械学会，2019 年

修了生総代，電気通信大学 機械知能システム学専攻 博士前期課程 2019 年

## 奨学金

日本学術振興会特別研究員（DC2），奨学期間: 2020 年 04 月～2022 年 03 月

文部科学省外国人留学生学習奨励費, JASSO, 奨学期間: 2019 年 11 月～2020 年 03 月

## 外部資金

科学研究費補助金（特別研究員奨励費，課題番号：20J14065）

令和3年度博士論文

ワイヤ干渉駆動モジュールを用いた  
人型ロボットアームの開発

---

電気通信大学 情報理工学研究科  
機械知能システム学専攻 姜研究室

李文揚

提出年月日 2022年03月24日

---