可操作性だ円体を用いた パワーアシスト型移動ロボットの操作性の評価

上 野 祐 樹^{*1} 北 川 秀 夫^{*2} 寺 嶋 一 彦^{*3}

Evaluation of the Maneuverability of the Power-Assisted Mobile Robot Using Manipulability Ellipsoid

Yuki Ueno^{*1}, Hideo Kitagawa^{*2} and Kazuhiko Terashima^{*3}

Getting a satisfactory maneuverability in a power-assisted mobile robot is the most important subject. The difficulty in this subject is in a difference of the characteristics of operators. This research focused on the operation of the power-assisted mobile robot with velocity-based impedance control. From the analysis of experimental video, we found that there was a difference in the posture between operators. In order to analyze the difference quantitatively, manipulability ellipsoid which is used for the analysis of manipulators is used. From results, an operator which takes larger size of the manipulability ellipsoid to the moving direction can operate the robot smoothly. Additionally, results show that maneuverability can be improved by adjusting the handle position to become the manipulability ellipsoid larger. However, the structure of a handle cannot be designed freely in almost robots. In this case, maneuverability can be improved by adjusting parameters of the controller depending on the size of manipulability ellipsoid, if it can be measured directly or indirectly.

Key Words: Power-assist, Omni-directional Mobile Robot, Manipulability Ellipsoid

1. は じ め に

近年、作業負担を軽減可能なパワーアシスト機器が注目を集めている。特に力入力に対して内部モデルの動特性に基づいて位置や速度を制御する、位置制御ベースのインピーダンス制御は、既存の機器に容易に応用可能であることから広く用いられている [1]。しかしながら本制御手法は、外部環境の剛性が高いと不安定になることが知られている [2]。これに対して、外力推定値を用いた接触安定化手法や、動特性調節器により環境と人の動特性を非干渉化させることで安定化を図る手法などが提案されており、その有効性が示されている [3] [4]。

パワーアシスト機器のように人と協調動作する機器において、より良い操作性の実現は重要な課題である。特に福祉機器の場合、介助者は要介護者に対する安全を最重要視するため、患者に対する安全性が保証できないと使用されないことがある [5]。一方で安全のために応答性を落とすと操作感が悪くなり、使用

を避けられる場合もある。

パワーアシストの操作性を決めるのはコントローラのパラメータであるが、最適なパラメータは人により異なる。人の特性や嗜好を考慮したコントローラの設計は有効な手段であり、これまで様々な例がある。Flash らによって、人のリーチング動作が躍度最小軌道に従うことが明らかになった [6]。躍度最小軌道は、操作性の評価や軌道生成の規範などとして用いられており、操作性の向上を実現している [7] [8]。また手先インピーダンス特性の推定や特徴の解析などが行われている [9] [10]。これらの研究は、手先の運動に限定したものや、決められた区間での移動であったのに対し、山田らは、移動速度や距離が変動した場合であっても、適切にインピーダンスパラメータを調節することで操作性を向上させるスキルアシストシステムを開発した [11]。

筆者らのグループでは、全方向移動車いすの開発、および操作支援システムの一つとしてパワーアシストシステムの開発を行っている [12]。また、走行状態をファジィ推論により推定し、走行状態に応じてインピーダンスを調節することで安定した操作を可能とし、操作の熟練度に応じてインピーダンスの変動幅を調節することで操作の違和感を解消するスキルアシストシステムの開発を行っている [13]。これらのシステムは車いすだけでなく、ベッドの搬送等にも応用されており、今後更なる応用機器の拡大が期待されている [14]。

パワーアシストにおいて、ある操作者に対して調節されたパ

原稿受付 2014 年 12 月 26 日

^{*1}東京工科大学

^{*2}岐阜工業高等専門学校

^{*3}豊橋技術科学大学

^{*1}Tokyo University of Technology

^{*2}National Institute of Technology, Gifu College

^{*3}Toyohashi University of Technology

■ 本論文は新規性（実証実験分野）で評価されました。

Fig. 1 Photograph of the 3D-OMP

Table 1 Specification of the 3D-OMP

Size (diameter × height)	φ680 × 1,500 [mm]
Weight	80 [kg]
Motor capacity	150 [W] × 6
Max. velocity	1.12 [m/s]

ラメータが、他者にとって良いものであるとは限らず、最悪の場合、不安定になり操作者を含め周囲に危険が及ぶこともある。これは操作者ごとに特性が異なるためであるが、これまでこの要因について議論されていない。この要因が明らかになれば、合理的なパラメータ設計手法や、コントローラの改善手法の提案等が可能になると考える。本研究では、車いすや台車などの機器の操作負担軽減を目的とするパワーアシストシステムにおいて、操作者ごとに姿勢が異なることに着目し、ロボットアームの解析に用いられる可操作性だ円体[15]を用いた解析により姿勢と操作性の関連性を定量的に評価した。

本稿では、第2章にて、本研究で用いる全方向移動ロボットの構成について述べ、第3章にて、パワーアシストシステムについて述べる。次に第4章では、操作者ごとに特性が異なる例を実験結果とともに示し、本研究にて操作者の姿勢の違いに着目するに至った経緯について述べる。第5章では、可操作性だ円体を用いた操作姿勢の解析結果を示し、姿勢の違いが操作性に及ぼす影響について述べる。最後に本研究にて得られた結果をまとめ今後の課題について述べる。

2. 全方向移動ロボット

本研究にて用いるロボット (3-wheel Drive Omni-directional Mobile Platform: 以下, 3D-OMP) の外観および仕様を Fig. 1 および Table 1 に示す。3D-OMP は、筆者らが開発した、キャスタ型全方向移動機構である差動駆動操舵機構 (DDSS) [16] が三輪搭載されている。またパワーアシスト用に、6軸力覚センサとハンドルが搭載されており、ハンドル高さは750~1,500 [mm] の範囲で変更できるよう設計されている。

制御機器の構成を Fig. 2 に示す。3D-OMP は、制御用 PC により制御される。DIO ユニットにより操舵角検出用エンコーダや、各種スイッチの信号を取得する。また6軸力覚センサは USB 接続により通信を行い、データを取得する。駆動用に搭載

Fig. 2 Configuration of the control system

Fig. 3 Block diagram of the power-assist system

されている6台のモータは、専用ドライバにて速度制御され、CAN 通信により目標速度の設定や実測速度、電流の取得ができる。

3. パワーアシストシステム

パワーアシストシステムのブロック図を Fig. 3 に示す。人が加えた力 f_h は6軸センサを介して得られ $[f_x, f_y, m_z]$ 、時定数 0.1 [s] のローパスフィルタによりノイズ除去される。ノイズ除去された力データ $[f_x^f, f_y^f, m_z^f]$ は、次式に示す一次遅れコントローラにより指令速度 $[\dot{x}_v^c, \dot{y}_v^c, \dot{\theta}_v^c]$ へ変換される。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_v^c \\ \dot{y}_v^c \\ \dot{\theta}_v^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_x}{T_x s + 1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_y}{T_y s + 1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_z}{T_z s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x^f \\ f_y^f \\ m_z^f \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 K_x, K_y, K_z および T_x, T_y, T_z はコントローラのゲインと時定数であり、重さや応答性などの操作感はいこれらの値を調節することで変更できる。またこれらは、 m を慣性、 c を粘性とし、 $K = c^{-1}$ 、 $T = mc^{-1}$ とすることで、マス・ダンパ系のパラメータに置き換えることができる。

4. 操作特性の違いについて

コントローラのパラメータが一定値である場合、人により操作性が異なる。Fig. 4 は、その一例を示す2名の被験者による実験結果である。実験は、3D-OMP を前方へ3[m] 操作するものである。パラメータは被験者1に合わせて設定された。パラメータはそれぞれ、 $K_x = 0.06$ 、 $T_x = 0.50$ である。なお、マス・ダンパ系に置き換えると $m = 8.33$ 、 $c = 16.67$ である。

結果から、被験者1は滑らかに操作できているものの、被験者2は速度の変動が大きく、操作時間も増加していることが分かる。これは人により特性が異なり、最適なパラメータが異なるためであるが、その要因はこれまで明らかになっていない。

Fig. 4 Experimental result of two subjects

Fig. 5 Difference of the posture between two subjects

Table 2 Height of the handle[m]

Subject	1	2	3	4	5	6
(a)Low	0.850	0.800	0.800	0.820	0.780	0.790
(b)Mid	1.160	1.110	1.070	1.060	1.050	1.090
(c)High	1.480	1.420	1.390	1.360	1.480	1.430

ここで、実験動画の比較から得られた特徴的な画像を Fig. 5 に示す。両者には姿勢に大きな違いがあり、被験者 1 は肘を大きく曲げているのに対し、被験者 2 は曲げ方が少ないことが確認できる。パワーアシスト機能のない車いすなどを搬送する場合、腕を真直ぐ突っ張った状態にすることで効率的に力を伝えることができる。しかしパワーアシストの場合、少ない力で操作可能であるためこの必要はない。本実験で被験者 1 は、肘を大きく曲げた状態で少ない力で操作できるようパラメータを決定したが、被験者 2 は肘の曲げ方が被験者 1 に比べ小さく、同じパラメータでは余分に力が加わったがために操作が不安定になったと考えることができる。このように、操作性に姿勢が関係している可能性があり、それについて以下に考察する。

5. 可操作性だ円体を用いた操作性の評価

姿勢を定量的に評価するため、可操作性だ円体を用いる [15]。可操作性だ円体とは、ロボットアームの動かしやすさを表す指標であり、関節速度ベクトルのノルムが 1 以下となる手先速度ベクトルの集合である。このだ円体が真円に近いほど、すべての方向に均一に速度を発揮できることになり、円の扁平率が大きくなるほど出力に偏りが生じることになる。

本指標をパワーアシスト操作に適用すると、可操作性だ円体が大いほどロボットの動作に柔軟に対応でき、滑らかな操作が可能となることが予測できる。そこで、以下の実験を行った。

5.1 実験内容

実験は 6 名の被験者を用いて行った。実験内容は、第 4 章と同様に、3D-OMP を前方へ 3 [m] 操作するものである。一次遅れ

Fig. 6 7DOF arm model

コントローラのパラメータは、第 4 章の実験と同じ ($K_x = 0.06$, $T_x = 0.50$) で、以下に示す 3 段階のハンドル高さで、各 3 回ずつ操作を行う。ハンドル高は、直立した状態で以下の各部位までの床からの高さとする。

- (a) 第一中主骨骨頭 (Low)
- (b) 肘頭 (Middle)
- (c) 肩峰 (High)

なお、慣れによる影響も考えられるため、各ハンドル高さで操作練習を行った後にデータ取得を実施した。

各被験者のハンドル高を Table 2 に示す。

5.2 可操作性だ円体の導出

可操作性だ円体は、人の腕を Fig. 6 に示すような 7 自由度のロボットアームと見立て導出する。導出には各関節角度等が必要となるが、三次元位置分析装置 (VICON) を用いて、操作者の肩や肘、手首、手の甲などの位置を計測し、次の流れに沿って算出した。

VICON により取得した肩・肘・手首・手先位置の座標をそれぞれ、 $\mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_s = [p_{xs}, p_{ys}, p_{zs}]$, $\mathbf{p}_4 = \mathbf{p}_e = [p_{xe}, p_{ye}, p_{ze}]$, $\mathbf{p}_6 = \mathbf{p}_w = [p_{xw}, p_{yw}, p_{zw}]$, $\mathbf{p}_7 = \mathbf{p}_h = [p_{xh}, p_{yh}, p_{zh}]$ とする。また、肩から肘までの距離を l_{se} 、肘から手首までの距離を l_{ew} 、手首から手先の距離を l_{wh} 、肩から手首までの距離を l_{sw} 、肘から手先までの距離を l_{eh} とする。

各関節角度 ($q_1, q_2, \dots, q_6$) は、下式によって求まる。

$$q_1 = \sin^{-1} \frac{p_{xe} - p_{xs}}{C_2 l_{se}} \quad (2)$$

$$q_2 = \sin^{-1} \frac{p_{ye} - p_{ys}}{l_{se}} \quad (3)$$

$$q_3 = \sin^{-1} \frac{S_2(C_4 l_{ew} + l_{se}) - (p_{yw} - p_{ys})}{C_2 S_4 l_{ew}} \quad (4)$$

$$q_4 = \pi - \cos^{-1} \frac{l_{se}^2 + l_{ew}^2 - l_{sw}^2}{2 l_{se} l_{ew}} \quad (5)$$

$$q_5 = \cos^{-1} \frac{a_1(p_{yh} - p_{ys} - a_6) + a_4(a_3 - p_{xh} + p_{xs})}{a_1 a_5 - a_2 a_4} \quad (6)$$

$$q_6 = \pi - \cos^{-1} \frac{l_{ew}^2 + l_{wh}^2 - l_{eh}^2}{2l_{ew}l_{wh}} \quad (7)$$

ただし、式 (6) における変数 a_1 から a_6 は、

$$a_1 = (S_1 S_2 C_3 - C_1 S_3) S_6 l_{wh} \quad (8)$$

$$a_2 = ((S_1 S_2 S_3 + C_1 C_3) C_4 - S_1 C_2 S_4) S_6 l_{wh} \quad (9)$$

$$a_3 = (S_1 C_2 C_4 + (S_1 S_2 S_3 + C_1 C_3) S_4) C_6 l_{wh} \\ + (S_1 C_2 C_4 + (S_1 S_2 S_3 + C_1 C_3) S_4) l_{ew} \\ + S_1 C_2 l_{se} \quad (10)$$

$$a_4 = -C_2 C_3 S_6 l_{wh}$$

$$a_5 = -(S_2 S_4 + C_2 S_3 C_4) S_6 l_{wh}$$

$$a_6 = (S_2 C_4 - C_2 S_3 S_4) C_6 l_{wh} \\ + (S_2 C_4 - C_2 S_3 S_4) l_{ew} + S_2 l_{se} \quad (11)$$

である。また簡単化のため、 $\sin q_i = S_i$ および $\cos q_i = C_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6$) とした。なお、第 7 関節角度 q_7 については、可操作性だ円体の導出に不要なため、0 [rad] とした。

各関節角度を用いてヤコビ行列 J を導出し、特異値分解すると次式を得る。

$$J = U \Sigma V^T \quad (12)$$

ただし、 $U \in R^{3 \times 3}$ 、 $V^T \in R^{7 \times 7}$ 、

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & | & \\ 0 & \sigma_2 & 0 & | & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & \sigma_3 & | & \end{bmatrix} \in R^{3 \times 7}$$

である。J の特異値 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 はだ円体の主軸の長さを表している。またこれらの積は可操作性 w と呼ばれる。U はだ円体の正規直交基底をなし、これを用いて手先位置における可操作性楕円体を導出する。

5.3 実験結果

各ハンドル高さにおける、被験者 1 および被験者 4 の結果を Fig. 7 に示す。結果から、両被験者とも、(a)Low では安定した操作ができているものの、(b)Mid と (c)High では速度の変動が大きくなっていることが確認できる。しかしながら、(c)High の結果を見ると、変動の幅は被験者 1 のほうが 4 よりも小さく、操作時間も短いことが分かる。また両被験者の速度に周期的な振動が現れているが、これはほぼすべての被験者において見られ、FFT により得られた周期の平均値は 1.67 [Hz] であった。本現象は、機器の剛性やタイヤの変形等による構造的な振動である可能性が高いが、本研究では、この周期に合わせて起こる速度の変動をもとに操作性の解析を行う。

次に、被験者 1 と 4 の操作中の姿勢および可操作性だ円体を Fig. 8 および Fig. 9 に示す。図は、操作開始と終了点時間の中間点のデータを抜き出したものである。また、操作者を右斜め前方から見た構図となっており、図中の大きい四つの点は肩・

Fig. 7 Experimental result of the velocity along the x-axis of the 3D-OMP

肘・手首・手先の位置を示しており、実線で示した各リンクにより繋がっている。点群は三次元的に見た可操作性だ円体を示す。さらに、太い実線で示しただ円は、可操作性だ円体の X-Y 平面での切断面を表している。ここで、手先からだ円まで伸びる線は、進行方向に対するだ円体の大きさを示しており、以降、進行方向に対する可操作性 M_{opd} と呼ぶ。図中に、操作開始から終了までの間の M_{opd} の平均値 $\overline{M}_{opd}$ を示す。 $\overline{M}_{opd}$ を比較すると、被験者 1 は被験者 4 に比べて大きく、被験者 1 の (c)High の結果は、被験者 4 の (a)Low の結果よりも大きいことが分かる。このとき被験者 1 は、図からも分かるように、肘を大きく曲げて操作を行っていた。なお、Fig. 10 に示すとおり、 M_{opd} は操作中に大きく変化することはない。

ここで、操作のしにくさについて定量的に評価するために、以下の評価関数を定義する。

$$E_{op} = \frac{s_{ax}}{\bar{x}_v} \cdot t_{op} \quad (13)$$

s_{ax} および $\bar{x}_v$ 、 t_{op} はそれぞれ、操作開始から終了までの X 軸方向加速度の標準偏差と X 軸方向速度の平均値、操作に要した時間であり、 E_{op} が大きいほど操作がしにくいことを示す。加速度の標準偏差は変動の大きさを示すが、操作が不安定になると速度低下に伴い加速度も低下する。実際には操作しにくくても値が小さくなってしまいうため、単体では操作性の評価に向かない。操作が不安定になると速度低下と操作時間が増加する傾向が見られたため、それらを踏まえ本指標を定義した。

Table 3 に全被験者の E_{op} および $\overline{M}_{opd}$ の結果をまとめる。一部の実験においてデータ取得に失敗したため、空欄としている。また、被験者 3 の (c)High の結果については、最初の 2 回は操作が不安定になり、安全のため実験を中断したため、参考までに括弧書きにてデータを記した。3 回めは同様の危険が生

Fig. 8 Manipulability ellipsoid of subject 1

じる可能性があるため、中止した。結果から、すべての被験者において、ハンドル高が高くなるにつれ E_{op} が増加し、 $\bar{M}_{opd}$ 低下する傾向が見受けられることが分かる。また実験後のアンケートにおいても、(c)High が最も操作しにくく、(a)Low と (b)Mid で同程度の操作感であると回答する被験者が多かった。さらに前述のとおり、被験者 1 の (c)High と被験者 4 の (a)Low の $\bar{M}_{opd}$ 結果は近い値となっているが、 E_{op} についても同様のことが言え、式 (13) の妥当性が確認できる。

以上より、進行方向に対する可操作度が操作性に影響することが分かった。この結果は、進行方向に対する可操作度が大きくなるよう、姿勢を変化させること、あるいはハンドルの位置や形状を工夫することで操作性が改善できる可能性を示す。

しかしながら実際は、装置の機構的制約によりハンドル位置を自由に変更できない場合が多い。この場合、パラメータを調節して安定性を向上させる以外に方法はない。そこで慣性項と粘性項が操作性に与える影響について次の実験を行った。実験は被験者 3 から 6 を用いて、コントローラの粘性項が慣性項だ

Fig. 9 Manipulability ellipsoid of subject 4

Fig. 10 Experimental result of manipulability to the operational direction

け増加させ、これまでと同様に 3 段階のハンドル高さで操作するものである。Fig. 11 に、被験者 4 のハンドル高さ (c)High での操作実験の結果を示す。上段は粘性項を、下段は慣性項をそれぞれ増加させたときの速度の結果である。図からも分かる

Table 3 Experimental result

Handle height	Trial No.	Sub. 1		Sub. 2		Sub. 3		Sub. 4		Sub. 5		Sub. 6	
		E_{op}	$\overline{M}_{opd}$	E_{op}	$\overline{M}_{opd}$	E_{op}	$\overline{M}_{opd}$	E_{op}	$\overline{M}_{opd}$	E_{op}	$\overline{M}_{opd}$	E_{op}	$\overline{M}_{opd}$
(a)Low	1	10.45	0.382	11.22	0.288	40.82	0.219	10.32	0.214	16.87	0.255	5.18	0.294
	2	6.46	0.429	6.77	0.265	36.56	0.217	12.55	0.245	11.87	0.251	4.08	0.293
	3	6.90	0.488	8.60	0.254	33.15	0.206	12.43	0.205	13.60	0.243	—	—
(b)Mid	1	11.54	0.313	9.60	0.277	52.73	0.213	24.72	0.121	15.53	0.212	5.68	0.258
	2	13.42	0.303	—	—	43.48	0.223	20.44	0.114	15.90	0.198	—	—
	3	11.95	0.303	5.17	0.283	52.77	0.234	23.23	0.114	15.20	0.222	—	—
(c)High	1	13.89	0.254	50.03	0.105	(256.0)	(0.149)	61.91	0.089	19.54	0.134	9.16	0.174
	2	—	—	27.07	0.101	(-216.3)	(0.131)	61.56	0.088	17.16	0.133	5.41	0.185
	3	14.33	0.260	25.50	0.119	no data	no data	47.61	0.092	16.68	0.127	5.17	0.177

Fig. 11 Experimental result of subject 4 in same handle height and different mass (or viscosity) coefficient

ように、粘性項を増加させても操作性は改善されず、慣性項を増加させることで操作性が改善できていることが確認できる。Table 4 に E_{op} および $\overline{M}_{opd}$ の結果を示す。結果から、全被験者において、 $\overline{M}_{opd}$ が小さい場合でも、慣性項を増加させることで E_{op} を低減でき、操作性が改善されていることが確認できる。

この原因について考察すると、粘性項の増加は、一次遅れコントローラのカットオフ周波数の増加とともにゲイン低下も引き起こす。この場合、高周波成分の影響で速度の変動が生じ、操作しにくい結果になったと考えられる。一方慣性項の増加は、一次遅れコントローラのカットオフ周波数を低下させる方向に働く。これにより高周波成分が除去され、速度の変動が少なくなったため、操作しやすくなったと考えられる。ただし、慣性項を増加させることは応答性の低下に繋がる。操作者によってはこれを不快に思うことがあるため、本実験の結果からは、単に進行方向に対する可操作度が低い場合に慣性項を増加させることで操作が安定する傾向にあると断言できるとは限らない。

6. おわりに

本研究では、パワーアシスト型移動ロボットにおいて人により操作特性が異なることについて、姿勢の違いに着目し解析を行った。姿勢の定量的な評価には、ロボットアームの解析に用いられる可操作度円体を用いた。また、操作のしにくさを表す評価関数を定義し、異なるハンドル高さによる実験結果を6名の被験者で比較したところ、可操作度円体の進行方向に対する大きさ（進行方向に対する可操作度）が小さいほど、操作しにくくなるということが分かった。

Table 4 Experimental result, Case 1 : Only viscosity coefficient changes, Case 2 : Only mass coefficient changes

Handle height	Case	Sub. 3		Sub. 4	
		E_{op}	$\overline{M}_{opd}$	E_{op}	$\overline{M}_{opd}$
(a)Low	1	53.40	0.244	8.50	0.217
	2	11.22	0.214	4.01	0.206
(b)Mid	1	73.64	0.200	21.13	0.134
	2	26.43	0.223	8.86	0.133
(c)High	1	(-163.0)	0.177	59.75	0.103
	2	36.69	0.142	8.06	0.091

Handle height	Case	Sub. 5		Sub. 6	
		E_{op}	$\overline{M}_{opd}$	E_{op}	$\overline{M}_{opd}$
(a)Low	1	12.16	0.274	7.47	0.330
	2	4.38	0.249	4.40	0.288
(b)Mid	1	21.02	0.197	5.73	0.238
	2	3.64	0.193	4.34	0.220
(c)High	1	23.46	0.139	5.36	0.186
	2	5.95	0.120	4.92	0.185

本研究にて得られた知見から、操作性改善に有効な手段として、進行方向に対する可操作度が大きくなるよう姿勢を変化させることや、ハンドル位置や形状を変更することが挙げられる。しかしながら機器の制約上、自由にハンドル位置を変更できない場合がある。これに対し本研究では、実験結果から、コントローラの慣性項を増加させることで操作性の改善が可能であることが確認できた。ただし本研究では、最適なパラメータに関する調査は行っていないため、単に慣性項を増加させることで操作が安定化に向かう傾向があると言いつても過言ではない。

今後は、人により姿勢が異なる要因の究明を行い、最適なパラメータ導出手法について検討する。

参考文献

- [1] K. Kosuge, K. Furuta and T. Yokoyama: "Virtual internal model following control of robot arms," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.4, pp.1549-1554, 1987.
- [2] 榊泰輔, 館暉: "インピーダンス制御の接触安定性についての一考察", 日本ロボット学会誌, vol.12, no.3, pp.489-496, 1994.
- [3] 武居直行, 野畑茂広, 藤本英雄: "安定した接触を実現するアドミタンス制御手法", 日本ロボット学会誌, vol.26, no.6, pp.635-642, 2008.
- [4] 入野功輔, 積際徹, 横川隆一: "拘束空間におけるインピーダンス制御の安定化を実現する動特性調節器の設計・開発", 日本機械学会論文集中C編, vol.79, no.802, pp.2048-2061, 2013.
- [5] 岩切一幸, 高橋正也, 外山みどり, 平田衛, 久永直見: "高齢者介護施設における介護機器の使用状況とその問題点", 産業衛生学会誌,

- vol.49, no.1, pp.12–20, 2007.
- [6] T. Flash and N. Hogans: “The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model,” *Journal of neuroscience*, vol.5, pp.1688–1703, 1985.
- [7] M.M. Rahman, R. Ikeura and K. Mizutani: “Investigating the impedance characteristic of human arm for development of robots to co-operate with human operators,” *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol.2, pp.676–681, 1999.
- [8] 前田雄介, 原崇之, 新井民夫: “躍度最小モデルを用いた動作予測に基づく人間—ロボット協調作業”, *日本機械学会論文集 C 編*, vol.68, no.68, pp.3367–3372, 2002.
- [9] 辻敏夫, 後藤和弘, 伊藤宏司, 長町三生: “姿勢維持中の人間の手先インピーダンスの推定”, *計測自動制御学会論文集*, vol.30, no.3, pp.319–328, 1994.
- [10] 五味裕章, 大須理英子: “関節スティフネスおよび手先スティフネスの変化”, *電子情報通信学会技術研究報告 NC, ニューロコンピューティング*, vol.95, no.599, pp.283–290, 1996.
- [11] 山田陽滋, 鴻巣仁司, 森園哲也, 梅谷陽二: “自動車組立工程における搭載作業のためのスキルアシストの提案”, *日本機械学会論文集 C 編*, vol.68, no.666, pp.509–516, 2002.
- [12] 北川秀夫, 西坂晋, 三好孝典, 寺嶋一彦: “介助式全方向移動車椅子のためのパワーアシストシステムの構築”, *日本ロボット学会誌*, vol.23, no.3, pp.321–329, 2005.
- [13] K. Terashima, K. Watanabe, Y. Ueno and Y. Masui: “Auto-tuning Control of Power Assist System Based on the Estimation of Operator's Skill Level for Forward and Backward Driving of Omni-directional Wheelchair,” *International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2010)*, pp.6046–6051, 2010.
- [14] Y. Ueno, H. Kitagawa, K. Kakiyama, T. Sakakibara and K. Terashima: “Development of an Innovative Power-Assist Omni-Directional Mobile Bed Considering Operator's Characteristics,” *International Journal of Automation Technology*, vol.8, no.3, pp.490–499, 2014.
- [15] 吉川恒夫: “ロボットアームの可操作度”, *日本ロボット学会誌*, vol.2, no.1, pp.63–67, 1984.
- [16] 上野祐樹, 北川秀夫, 柿原清章, 寺嶋一彦: “全方向移動ロボットのための平衡車型差動駆動操舵機構の開発”, *日本機械学会論文集 C 編*, vol.78, no.789, pp.1872–1885, 2012.

上野祐樹 (Yuki Ueno)

2014 年豊橋技術科学大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。同年同大学機械工学系博士研究員の後, 2015 年東京工科大学工学部機械工学科助教。日本機械学会, 計測自動制御学会, IEEE の会員。
(日本ロボット学会正会員)

北川秀夫 (Hideo Kitagawa)

1988 年名古屋大学大学院修士課程電子機械工学専攻修了。博士 (工学)。1990 年岐阜工業高等専門学校助手, 講師, 助教授, 豊橋技術科学大学生産システム工学系助教授等を経て, 2008 年岐阜工業高等専門学校電子制御工学科教授。電子情報通信学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会の会員。
(日本ロボット学会正会員)

寺嶋一彦 (Kazuhiko Terashima)

1981 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。1982 年豊橋技術科学大学生産システム工学系助手。講師, 助教授を経て, 1994 年教授。現在に至る。1991 年 9 月～1992 年 9 月ドイツミュンヘン工科大学客員研究員。システム制御情報学会, 日本機械学会, 日本 Casting 学会, IEEE 等の会員。
(日本ロボット学会正会員)