

作動範囲に基づく把持システム可操作性指標

渡辺 哲陽*

Operation Range based Manipulability Measures for Grasping System

Tetsuyou Watanabe*

This paper presents a novel approach for manipulability for grasping systems. We present a new manipulability measure to evaluate how much easily the robot manipulates the grasped object, simultaneously keeping stable grasp. For the purpose, we use operation range. The operation range is for actuator attached to every joint of robot and provides generable joint torque and velocity and their relation (between generating torque/velocity and actually usable velocity/torque). While we introduced a manipulability measure using the operation range in our previous paper, it was for a limited class due to large computational effort and we could not evaluate whole space of object velocity and could not consider whole space of external wrench. In this paper, we propose new manipulability measures which can be derived simply and can evaluate whole space of object velocity, taking the effect of whole external wrench into consideration.

Key Words: Manipulability, Grasping System, Operation Range

1. はじめに

可操作性は、ロボットマニピュレータの性能を評価する一指標としてよく知られている [1]。シングルアームマニピュレータに関しては、発生可能な関節速度の集合が与えられた場合において、発生可能な手先速度の集合として定義される。発生可能な関節速度の集合が超球として与えられた場合、手先速度の集合は楕円体として表すことができる。この楕円体は可操作性楕円体と呼ばれ、その体積は可操作性度と呼ばれる。可操作性は、速度領域におけるロボットの性能を評価する指標である。この可操作性に基づき、条件数など様々な評価指標が考案されている [1]。この概念は、ロボットハンドをはじめとする一般の拘束機構に対しても適用することができる [2]~[6]。この場合、手先速度の代わりに、拘束を受ける対象物の速度集合が評価対象となる。Chiacchio ら [2] は二本アームシステムに対する可操作性を解析した。その後、Bicchi ら [3] がホールアームマニピュレーションを含む一般の把持システムの可操作性を解析した。また、Bicchi ら [4]、Wen ら [5]、Park ら [6] は自由関節を含む一般の拘束機構における可操作性を解析した。

把持システムでは、把持そのものが重要課題である。把持の議論は力領域で行われる。その一方で、可操作性の議論は速度領域で行われる。上記の拘束機構の可操作性に関する研究では、把

持システムを扱う場合、force closure [7] (任意方向に力・モーメントを作用させることができる状態) を仮定し、力領域での議論を回避していた。その結果、解析対象となり得る把持システムは限られたものとなっていた。把持システムではなく、閉リンク系を扱っていたと考えることもできる。一方で、把持の安定性 (ここでは滑らせずに対象物を把持すること) に関して様々な解析が行われている [8]~[13]。しかしながら、操作性の観点を考慮に入れた解析は行われていない。以上をかんがみ、前研究 [14] では、把持の安定性を考慮に入れた操作性解析を行った。しかしながら得られた結果は限られている。特に、その計算の複雑さ、計算量の大きさが問題であった。そこで本研究では、より簡便に高速に計算できる新しい可操作性の指標を提案する。本研究の概要を以下に述べる。

1) 対象物に加わる重力などの外力の影響を考慮するため、外力をバランスし、把持を安定に保つために必要な関節トルクを求める。このため、バランスすることを求められる外レンチの集合として、要求外レンチ集合 (REWS) [13] [15] を定義する。REWS に含まれる任意の外レンチがバランスできるなら、把持の安定性は保たれるものとする。この REWS を用いて、把持に必要な最小の関節トルクを求める。前研究 [14] では、凸多面体として与えられる REWS のみを使用した。しかしながら、外レンチの集合が凸多面体となるとは限らない。例えば、ある大きさの外力が任意方向から加わる場合、REWS は楕円体または超球として与えられる。この場合、楕円体または超球を凸多面体として近似することも考えられるが、高次元において近似表現すると、膨大な数の頂点や面が必要となり、扱いが困難と

原稿受付 2009年12月19日

*金沢大学理工研究域

*College of Science and Engineering, Kanazawa University

■本論文は学術的に評価されました。

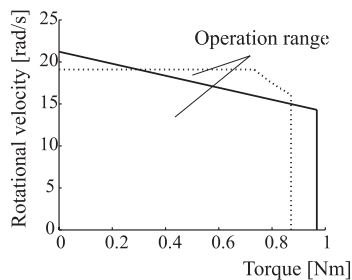


Fig. 1 Operation range of torque and velocity (maxon DC motor Amax32 (20 [W]) with gear (ratio: 23:1)); Rigid line: supposing to control with nominal voltage, Dot line: supposing the case when power and maximum torque and velocity are only given and 70% of the power and 90% of the maximum torque and velocity are used

なる。本研究では、REWSが凸多面体としてだけでなく楕円体または超球として与えられる場合についても、把持を安定に保つのに必要な関節トルクを導出する方法を提案する。

2) 把持安定に必要な関節トルクをもとに、実際に発生可能な関節速度を導出する。このため、**Fig. 1**に示すようなロボットの各関節に取り付けられたアクチュエータの作動範囲を用いる。作動範囲は、もともと、モーターの選定に用いられるものである。作動範囲より、アクチュエータがどのくらい大きなトルクと速度を安定に発生できるか、発生可能速度と発生可能トルクはどのような関係にあるか、が分かる。**Fig. 1**における実線は定格電圧下でモーターを制御する場合の作動範囲である。モーターのパワー、最大トルク、最大速度などの情報しか得られない場合もある。このような場合、パワー = トルク × 速度の関係から、**Fig. 1**における点線のような作動範囲を設定できる。このような場合、作動範囲は凸多面体となるとは限らない。前研究では、凸多面体として与えられる作動範囲のみしか扱えなかった。本研究では、作動範囲が凸多面体でなく一般の集合として与えられる場合、発生可能な関節速度を導出する方法を与える。

3) 導出した発生可能な関節速度をもとに、発生可能な対象物速度を導出する。前研究では、その計算複雑性から、限られたクラスの対象物速度のみを評価していた。多数の変数を高次元空間において扱う必要があったためである。このため、その評価結果を適用できるシステムや問題（例：動作計画）は限られていた。例えば、すべての方向に対して発生可能な対象物速度の最大値やどの方向に最大の対象物速度を発生できるかは導出できなかった。本研究では、六次元からなる対象物速度を評価する方法を提案する。特に、あらゆる方向に発生可能な対象物速度の最大値と、発生可能な対象物速度の最大値に着目し、これらをもとに新しい可操作性指標を与える。前者は、発生可能対象物速度集合に内接する超球の半径に、後者は、外接する超球の半径に対応する。

2. 問題設定

2.1 対象とする系

対象とする系を**Fig. 2**に示す。 N 本指のロボットハンドで任意形状の剛体対象物を把握することを考える。使用する記号を付録Aに示す。本論文では、1) F-point：摩擦あり点接触、

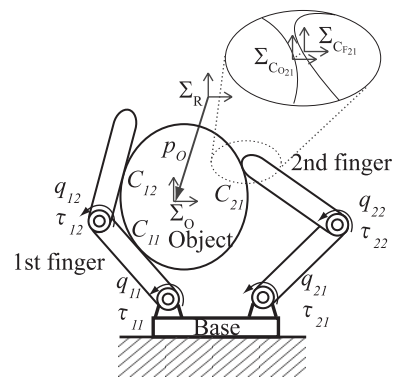


Fig. 2 Target system ($N = 2$)

2) N-point：摩擦なし点接触、の二つの接触状態を考慮する。各接点位置、各接触状態、摩擦係数は与えられるものとする。関節トルク・速度の最小値の絶対値は、関節トルク・速度の最大値の絶対値に等しいものとする。

2.2 問題設定

ここでは、いくつかの集合を定義した後で、本論文で扱う問題を定義する。

関節トルク・速度対集合 (TVS)：各関節において、対応するアクチュエータの作動範囲より定まる、発生可能な関節トルク・速度の集合を関節トルク・速度対集合 (joint Torque-Velocity pair Set (TVS)) と呼ぶ。

作動範囲は、一般に関節トルクと速度の絶対値に対して与えられる。作動範囲より得られる発生可能な関節トルクおよび速度の最大絶対値を $|\tau_{ij_{max}}|$ と $|\dot{q}_{ij_{max}}|$ で表す。また、(発生している関節トルクや速度をもとに) 実際に利用可能な関節トルクおよび速度の最大絶対値を $|\tau_{ij_{Umax}}| (\geq 0)$, $|\dot{q}_{ij_{Umax}}| (\geq 0)$ で表す。作動範囲と現在発生している $|\tau_{ij}|$ ($|\dot{q}_{ij}|$) から $|\dot{q}_{ij_{Umax}}|$ ($|\tau_{ij_{Umax}}|$) を導出する関数を $\xi_{ij}^{\tau \rightarrow \dot{q}}$ ($\xi_{ij}^{\dot{q} \rightarrow \tau}$) とおく。

$$|\dot{q}_{ij_{Umax}}| = \xi_{ij}^{\tau \rightarrow \dot{q}}(|\tau_{ij}|), \quad (1)$$

$$|\tau_{ij_{Umax}}| = \xi_{ij}^{\dot{q} \rightarrow \tau}(|\dot{q}_{ij}|). \quad (2)$$

使用モーターがDCモーターの場合、トルク-速度特性などのモーター特性が分かれば、**Fig. 1**の実線に示すような凸多面体で構成される作動範囲を導出できる。しかし、パワー、最大トルク・速度などの情報しか得られない場合もある。このような場合、 i 番目の指の j 番目の関節のモーターの評価用パワーを ψ_{ij} として、以下で定義される $\xi_{ij}^{\tau \rightarrow \dot{q}}$ を用いる (**Fig. 1**の点線参照)。

$$\xi_{ij}^{\tau \rightarrow \dot{q}} = \begin{cases} \psi_{ij}/|\tau_{ij}| & \psi_{ij} \leq |\tau_{ij}| |\dot{q}_{ij_{max}}| \\ |\dot{q}_{ij_{max}}| & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (3)$$

対象物には重力や外乱のような外レンチが働く。安定把持のためには、このような外レンチをバランスする必要がある。そこで、この影響を考慮するため、以下の集合を考える。

要求外レンチ集合 (REWS)：バランスすることを求められる外レンチの集合を要求外レンチ集合 (Required External Wrench Set (REWS)) と呼ぶ。REWSに含まれる任意の外レンチをバランスすることができたら、その把持は安定であるとする。

REWS は凸多面体もしくは楕円体として表されるとする.

$$S_{rew}^{pol} = \{w_{ex} | w_{ex} = \sum_{i=1}^{n_{rew}} \lambda_i w_{v_i}, \sum_{i=1}^{n_{rew}} \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0\}, \quad (4)$$

$$S_{rew}^{clip} = \{w_{ex} | w_{ex}^T M_w^T M_w w_{ex} \leq 1\}. \quad (5)$$

ここで, w_{ex} は外レンチを, w_{v_i} は凸多面体の頂点を, n_{rew} は頂点の数を, M_w は重み行列, λ_i は凸多面体を表示するための変数を表している. 力とモーメントの単位の違いを考慮したり, 外レンチの大きさを正規化するため, 重み行列を導入している. なお, REWS が凹形状の集合などで表される場合は, それを含む最小の凸多面体もしくは楕円体を用いるものとする.

評価指標: 本論文では, 以下の評価指標を考える.

α_{max}^{all} : あらゆる方向に発生可能な対象物速度の最大値.

α_{max} : 発生可能な対象物速度の最大値.

α_{max}^{all} は任意方向で使用可能な対象物速度を表す. コントローラを設計するときなど, どの方向の速度が必要になるかわからない場合, この速度をもとに設計ができる. また, ある方向に速度が発生できないといった一種の特異姿勢からの距離と考えることもできる. α_{max} は, 最大に発生可能な速度であり, α_{max}^{all} との比から, どの程度あらゆる方向にまんべんなく速度を発生できるかを評価できる.

以上をもとに, 以下の問題を定義する.

問題: TVS と REWS が与えられるものとする. このとき, REWS に含まれる任意の外レンチをバランスできるという条件のもとで, α_{max}^{all} ならびに α_{max} を求めよ.

3. 作動範囲に基づく可操作性指標

まず, 運動学, 静力学, 摩擦条件について述べ, その後, 新しい可操作性指標を導出する.

3.1 運動学

接触点 C_{ij} に関して, $p_{C_{F_{ij}}}$ と q_i , ならびに $p_{C_{O_{ij}}}$ と r の速度間の関係は以下のように表すことができる.

$$\dot{p}_{C_{F_{ij}}} = J_{ij} \dot{q}_i, \quad \dot{p}_{C_{O_{ij}}} = G_{ij}^T \dot{r}. \quad (6)$$

ここで, $J_{ij} \in \mathcal{R}^{d \times M_i}$ はヤコビ行列であり,

$$G_{ij} = \begin{bmatrix} I \\ [(p_{C_{O_{ij}}} - p_o) \times] \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{D \times d}$$

である. I は単位行列を, $[a \times]$ は外積演算 ($[a \times]b = a \times b$) に等価な歪対称行列を表している.

$\dot{p}_{C_{F_{ij}}}$ と $\dot{p}_{C_{O_{ij}}}$ の関係は以下のように表される.

$$H_{ij}(\dot{p}_{C_{F_{ij}}} - \dot{p}_{C_{O_{ij}}}) = o, \quad H_{ij} = \begin{cases} I & \text{for F-point} \\ n_{ij}^T & \text{for N-point} \end{cases}$$

ただし, o は零ベクトルを表す.

ここで, 以下の行列を用いて,

$$J_i = \text{col} [J_{ij}] \in \mathcal{R}^{L_i d \times M_i},$$

$$G_i = \begin{bmatrix} G_{i1} & G_{i2} & \cdots & G_{iL_i} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{D \times L_i d},$$

$$H_i = \text{diag} [H_{ij}] \in \mathcal{R}^{L_{ci} \times L_i d},$$

$$J_{Hi} = H_i J_i \in \mathcal{R}^{L_{ci} \times M_i}, \quad G_{Hi} = G_i H_i^T \in \mathcal{R}^{D \times L_{ci}},$$

i 番目の指に関してまとめると, 以下の関係を得る.

$$J_{Hi} \dot{q}_i = G_{Hi}^T \dot{r}$$

ここで, 以下の接触点速度を導入する.

$$\dot{p}_{Ci} = J_{Hi} \dot{q}_i = G_{Hi}^T \dot{r} \quad (7)$$

さらに以下のベクトルと行列を用いて

$$\dot{p}_C = \text{col} [\dot{p}_{Ci}] \in \mathcal{R}^{L_c}, \quad J_H = \text{diag} [J_{Hi}] \in \mathcal{R}^{L_c \times M},$$

$$G_H = \begin{bmatrix} G_{H1} & G_{H2} & \cdots & G_{HN} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{D \times L_c},$$

すべての指に関してまとめると, 次式を得る.

$$\dot{p}_C = J_H \dot{q} = G_H^T \dot{r} \quad (8)$$

3.2 静力学と摩擦条件

式 (8) と仮想仕事の原理より次式を得る.

$$\begin{bmatrix} \tau \\ -w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_H^T \\ -G_H \end{bmatrix} f. \quad (9)$$

もし, ロボットハンドの重力項を考慮に入れるなら, 式 (9) は以下ようになる.

$$\begin{bmatrix} \tau \\ -w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_H^T \\ -G_H \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} g_q \\ o \end{bmatrix}. \quad (10)$$

ただし, g_q はロボットハンドの重力項を表す (U_{ij} を i 番目の指の j 番目のリンクのポテンシャルエネルギーとして $g_q = \partial \sum_{i,j} U_{ij} / \partial q$). 次に, 摩擦条件について考える. 接触点 C_{ij} が F-point なら, 摩擦条件は以下のように表される.

$$\mathcal{F}_{f_{ij}} = \{f_{ij} \mid |T_{ij} f_{ij}| \leq \mu_{ij} n_{f_{ij}}, n_{f_{ij}} \geq 0\}. \quad (11)$$

C_{ij} が N-point の場合, 以下のように表される.

$$\mathcal{F}_{n_{ij}} = \{n_{f_{ij}} \mid n_{f_{ij}} \geq 0\}. \quad (12)$$

すべての接触点についてまとめると, 以下のように表すことができる.

$$\mathcal{F} = \{f \mid f_{ij} \in \mathcal{F}_{f_{ij}}, \forall C_{ij} \text{ which is F-point}, n_{f_{ij}} \in \mathcal{F}_{n_{ij}}, \forall C_{ij} \text{ which is N-point}\}. \quad (13)$$

3.3 可操作性指標

本節では, 可操作性指標について述べる. 計算量を減らすため, 次のような 3 ステップに分けて計算をする方法をとる. 1. REWS に含まれる任意の外レンチをバランスするのに必要な最小の関節トルクを求める. 2. 得られた関節トルクと作動範囲 (TVS) から実際に利用可能な最大の関節速度を求める. 3. 得

られた利用可能関節速度から発生可能な対象物速度を求める。3ステップに分けることで、各ステップにおいて考慮すべき変数の数・拘束条件を減らすことができる。また、把持維持に必要な最小の関節トルク、利用可能最大関節速度の情報を得ることができる。

ステップ1：摩擦条件 (11) を n_{fric} 面からなる凸多面錐で近似する [16]。すると、式 (13) は以下ようになる。

$$\mathcal{F}_{lin} = \{\mathbf{f} | \mathbf{V}\mathbf{f} \leq \mathbf{o}\} \quad (14)$$

ここで、 $\mathbf{V} \in \mathcal{R}^{L_v \times L_c}$ は、各行が摩擦凸多面体を構成する超平面の法線方向を表すベクトルまたは接触法線ベクトルから構成される行列である。

まず、REWSに含まれる任意の外レンチをバランスするのに必要な最小の関節トルク $|\tau_{ij_{mr}}|$ を求める。最初に、REWSが凸多面体 \mathcal{S}_{rew}^{pol} で与えられた場合について考える。式 (4)、(10)、(14) から、次の線形計画問題を解くことにより、 $|\tau_{ij_{mr}}|$ が得られる。

$$\begin{aligned} & \underset{|\tau_{ij_{mr}}|, \mathbf{f}_{v_i}}{\operatorname{argmin}} && \sum_{i,j} |\tau_{ij_{mr}}| \\ \text{subject to} &&& -\tau_{mr} \leq \mathbf{J}_H^T \mathbf{f}_{v_i} + \mathbf{g}_q \leq \tau_{mr} \\ &&& \mathbf{V}\mathbf{f}_{v_i} \leq \mathbf{o} \\ &&& \mathbf{G}_H \mathbf{f}_{v_i} = -\mathbf{w}_{v_i} \\ &&& (l = 1, \dots, n_{rew}) \end{aligned} \quad (15)$$

次に、REWSが楕円体 $\mathcal{S}_{rew}^{ellip}$ で与えられる場合について考える。式 (10)、(14) から、ある外レンチ $\hat{\mathbf{w}}_{ex} = \mathbf{M}_w \mathbf{w}_{ex}$ をバランスするための条件は次のように表される。

$$\begin{aligned} & \mathbf{A}_{w1} \hat{\mathbf{w}}_{ex} + \mathbf{A}_{w2} \mathbf{k}_w + \mathbf{A}_{w3} \boldsymbol{\tau}_{mr} \leq \mathbf{b}_w \\ & \mathbf{A}_{w1} = \begin{bmatrix} -\mathbf{J}_H^T (\mathbf{M}_w \mathbf{G}_H)^+ \\ \mathbf{J}_H^T (\mathbf{M}_w \mathbf{G}_H)^+ \\ -\mathbf{V} (\mathbf{M}_w \mathbf{G}_H)^+ \end{bmatrix} \\ & \mathbf{A}_{w2} = \left[(\mathbf{J}_H^T \boldsymbol{\Xi})^T \quad (-\mathbf{J}_H^T \boldsymbol{\Xi})^T \quad (\mathbf{V} \boldsymbol{\Xi})^T \right]^T \\ & \mathbf{A}_{w3} = \left[-\mathbf{I}^T \quad -\mathbf{I}^T \quad \mathbf{O}^T \right]^T, \quad \mathbf{b}_w = \left[-\mathbf{g}_q^T \quad \mathbf{g}_q^T \quad \mathbf{o}^T \right]^T \end{aligned} \quad (16)$$

ここで $(\mathbf{M}_w \mathbf{G}_H)^+$ は $\mathbf{M}_w \mathbf{G}_H$ の擬似逆行列を、 $\boldsymbol{\Xi}$ はその各列が $\mathbf{M}_w \mathbf{G}_H$ の零空間の正規直交規定を成す行列を、 \mathbf{k}_w は $\boldsymbol{\Xi}$ の各列の大きさを表す任意ベクトルを表している。

ここで、バランス可能な外レンチの集合を $[\hat{\mathbf{w}}_{ex}^T \quad \boldsymbol{\tau}_{mr}^T]^T$ の空間で考えたい。そこで、バランス可能な外レンチの集合を $[\hat{\mathbf{w}}_{ex}^T \quad \boldsymbol{\tau}_{mr}^T]^T$ の空間へ射影することを考える。まず、H-表示 (超平面で表現する方法) で表されている集合 (16) を V-表示 (頂点または稜線方向により表現する方法) に変換する [17]。

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}_w = \sum_{i=1}^{n_{Aw}} \lambda_i \mathbf{x}_{wvi}, \quad \sum_{i=1}^{n_{Aw}} \lambda_i = 1, \quad \lambda_i \geq 0, \\ & \mathbf{x}_w = \left[\hat{\mathbf{w}}_{ex}^T \quad \mathbf{k}_w^T \quad \boldsymbol{\tau}_{mr}^T \right]^T. \end{aligned}$$

\mathbf{x}_{wvi} は頂点を、 n_{Aw} はその数を表す。以下の行列を左から乗じることにより、 $[\hat{\mathbf{w}}_{ex}^T \quad \boldsymbol{\tau}_{mr}^T]^T$ の空間へ射影する。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{I} \end{bmatrix}.$$

その後、H-表示に変換する。

$$\hat{\mathbf{A}}_{w1} \hat{\mathbf{w}}_{ex} + \hat{\mathbf{A}}_{w3} \boldsymbol{\tau}_{mr} \leq \hat{\mathbf{b}}_w \quad (17)$$

$\hat{\mathbf{A}}_{w1}$, $\hat{\mathbf{A}}_{w3}$, $\hat{\mathbf{b}}_w$ はH-表示への変換により生成された数値行列・ベクトルである。H-表示からV-表示への変換、V-表示からH-表示への変換は cdd ライブラリ [17] により実行可能である。

ここで、集合 (17) を $\hat{\mathbf{w}}_{ex}$ 空間の集合ととらえる。一般に、原点と超平面 $\mathbf{a}^T \mathbf{x} = b$ との距離は $b/|\mathbf{a}|$ で与えられる。ゆえに、 $\boldsymbol{\tau}_{mr}$ が以下の条件を満足すれば、 $|\hat{\mathbf{w}}_{ex}| \leq 1$ (式 (5) を参照されたい) を満足する任意の $\hat{\mathbf{w}}_{ex}$ をバランスすることができる。

$$\operatorname{col}[\hat{\mathbf{a}}_{w1_i}] + \hat{\mathbf{A}}_{w3} \boldsymbol{\tau}_{mr} \leq \hat{\mathbf{b}}_w.$$

ただし、 $\hat{\mathbf{A}}_{w1} = \operatorname{col}[\hat{\mathbf{a}}_{w1_i}^T]$ である。

ゆえに、以下の線形計画法を解くことにより、必要な最小の関節トルク $|\tau_{ij_{mr}}|$ が得られる。

$$\begin{aligned} & \underset{|\tau_{ij_{mr}}|}{\operatorname{argmin}} && \sum_{i,j} |\tau_{ij_{mr}}| \\ \text{subject to} &&& \operatorname{col}[\hat{\mathbf{a}}_{w1_i}] + \hat{\mathbf{A}}_{w3} \boldsymbol{\tau}_{mr} \leq \hat{\mathbf{b}}_w \end{aligned} \quad (18)$$

以上では、楕円体 $\mathcal{S}_{rew}^{ellip}$ の中心が原点である場合について議論したが、中心が原点でない場合、つまり、一定の外力が対象物に加わる場合でも上記議論は有効である。一定外力が対象物に加わる場合、その一定外力を、式 (16) の右辺 \mathbf{b}_w の項に含めることで同様に議論できる。

ステップ2：ここで、 $\gamma = \max_{i,j} (|\tau_{ij_{mr}}| / |\tau_{ij_{max}}|)$ を導入する。もし $\gamma > 1$ なら、ロボットは物体を把持できない。この場合、 $\alpha_{max}^{all} = \alpha_{max} = 0$ となる。それ以外の場合、次の手順に進む。

得られた $|\tau_{ij_{mr}}|$ と式 (1) を用いて、利用可能な最大の関節速度 $|\dot{q}_{ij_{Umax}}|$ を導出する。

ステップ3：各関節において発生可能な関節速度の集合は以下のように表すことができる。

$$\{\dot{q}_{ij} = -\eta_1 |\dot{q}_{ij_{Umax}}| + \eta_2 |\dot{q}_{ij_{Umax}}|, \quad \sum_{k=1}^2 \eta_k = 1, \quad \eta_k \geq 0\} \quad (19)$$

ここで、 η_k は凸多面体を表すための変数を表す。各指に対する発生可能関節速度集合は、対応する指のすべての関節に対する発生可能関節速度集合の直和として表される。

$$\{\dot{\mathbf{q}}_i = \sum_{j=1}^{2M_i} \eta_j \dot{\mathbf{q}}_{i_{vj}}, \quad \sum_{j=1}^{2M_i} \eta_j = 1, \quad \eta_j \geq 0\}$$

ただし、 $\dot{\mathbf{q}}_{i_{vj}}$ は集合の頂点を表す。式 (7) より、発生可能な接触点速度 $\dot{\mathbf{p}}_{Ci}$ の集合は、以下のように表される。

$$\{\dot{\mathbf{p}}_{Ci} = \sum_{j=1}^{2M_i} \eta_j \mathbf{J}_{Hi} \dot{\mathbf{q}}_{i_{vj}}, \quad \sum_{j=1}^{2M_i} \eta_j = 1, \quad \eta_j \geq 0\}. \quad (20)$$

この集合を V-表示に変換する。

$$\mathbf{A}_{pi} \dot{\mathbf{p}}_{Ci} \leq \mathbf{b}_{pi}. \quad (21)$$

\mathbf{A}_{pi} , \mathbf{b}_{pi} は V-表示への変換により生成された数値行列・ベクトルである。式 (8) を用い、すべての指に関してまとめると、次式を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_r \dot{\mathbf{r}} &\leq \mathbf{b}_r, \\ \mathbf{A}_r &= \text{col} [\mathbf{A}_{pi} \mathbf{G}_{Hi}^T], \mathbf{b}_r = \text{col} [\mathbf{b}_{pi}]. \end{aligned} \quad (22)$$

この集合は、発生可能な対象物速度の集合を表す凸多面体である。例えば、単位の違いを考慮に入れるため、重み付き対象物速度を評価したい場合は、重み行列を用いて、式 (22) を以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{A}}_r \hat{\mathbf{r}} &\leq \mathbf{b}_r, \\ \hat{\mathbf{r}} &= \mathbf{M}_r \dot{\mathbf{r}}, \hat{\mathbf{A}}_r = \mathbf{A}_r \mathbf{M}_r^{-1}. \end{aligned} \quad (23)$$

$\hat{\mathbf{A}}_r = \text{col}[\hat{\mathbf{a}}_{ri}^T]$, $\mathbf{b}_r = \text{col}[b_{ri}]$ とする。上述と同様に、原点とこの凸多面体の面との距離は、 $b_{ri}/|\hat{\mathbf{a}}_{ri}|$ で与えられる。よって、 α_{max}^{all} は以下の問題を解くことで得られる。

$$\alpha_{max}^{all} = \min_i b_{ri}/|\hat{\mathbf{a}}_{ri}|. \quad (24)$$

α_{max} は、次の凸二次計画問題を解くことにより得られる。

$$\begin{aligned} \alpha_{max}^2 &= \max_{\hat{\mathbf{r}}} \hat{\mathbf{r}}^T \hat{\mathbf{r}} \\ \text{subject to } \hat{\mathbf{A}}_r \hat{\mathbf{r}} &\leq \mathbf{b}_r \end{aligned} \quad (25)$$

なお、 α_{max} を与える $\hat{\mathbf{r}}$ の方向は、最大の対象物速度を発生できる方向である。

α_{max} を得るもう一つの方法は以下のとおりである。式 (23) を V-表示に変換する。

$$\left\{ \dot{\mathbf{r}} = \sum_{i=1}^{n_{Ar}} \eta_i \dot{\mathbf{r}}_{vi}, \sum_{i=1}^{n_{Ar}} \eta_i = 1, \eta_i \geq 0 \right\}$$

ただし、 $\dot{\mathbf{r}}_{vi}$ はその頂点を、 n_{Ar} はその頂点の数を表す。すると、 α_{max} は以下の問題を解くことにより得られる。

$$\alpha_{max}^{all} = \max_i |\dot{\mathbf{r}}_{vi}|. \quad (26)$$

なお、V-表示が得られれば、例えば qhull [18] などを用いて、発生可能な対象物速度の集合の体積を求めることもできる。

4. 数 値 例

本手法の有効性を確かめるため、数値例を示す。Fig. 3 に対象とする系を示す。 Σ_R を Fig. 3 に示す状態における対象物とベースの間の接触点におく。 Σ_O を対象物の幾何学的中心におく。対象物は半径 0.1 [m] の球である。ロボットハンドは、四つの関節を持ち同じ構造からなる 4 本の指により構成される。各リンクの長さを 0.1 [m] とし、簡単のため、リンクの重量は考慮しない。各関節に取り付けられたアクチュエータはすべて同じものとする。アクチュエータの作動範囲は、Fig. 1 にて実線および点線で示されたものを用いる。指の根元位置は $[-0.1 \ -0.05 \ 0]^T$, $[0.05 \ 0.1 \ 0]^T$, $[0.05 \ 0 \ 0]^T$, $[0.05 \ -0.1 \ 0]^T$ とする。摩擦円錐

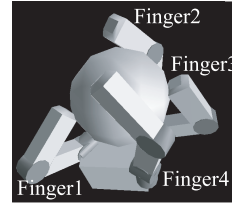


Fig. 3 Target system in numerical examples

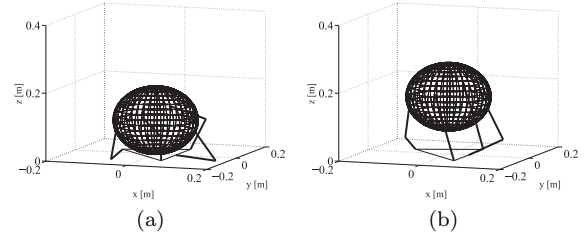


Fig. 4 (a) Initial state, (b) Final state

は、8 辺からなる摩擦凸多面錐により近似し、F-point における摩擦係数はすべて同じとし、 $\mu_{ij} = 0.3$ と設定する。

Fig. 4 に示すように z 方向正に対象物を動かす場合について考える。指 1, 指 2, 指 4 上の接触点を F-point とする。指 3 上の接触点を N-point とする。初期状態における、指、ベース上の接触点位置を $[-0.097 \ 0 \ 0.074]^T$, $[0 \ 0.097 \ 0.13]^T$, $[0.097 \ 0 \ 0.074]^T$, $[0 \ -0.097 \ 0.13]^T$, $[0 \ 0 \ 0]^T$ とおく。以下の二種類の REWS を考える。

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{rew}^{pol} &= \{\mathbf{w}_{ex} | \mathbf{w}_{ex} = [0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0]^T\}, \\ \mathcal{S}_{rew}^{elip} &= \{\mathbf{w}_{ex} | \mathbf{w}_{ex}^T \mathbf{M}_w^T \mathbf{M}_w \mathbf{w}_{ex} \leq 1\}, \\ \mathbf{M}_w &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & 0.1 \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、 \mathcal{S}_{rew}^{pol} の設定では、1 [N] の大きさの重力が z 軸負の方向に加わる場合を想定している。 \mathcal{S}_{rew}^{elip} の設定では、アーム部の動作のため、1 [N] の大きさの重力があらゆる方向から加わる場合を想定している。 $\dot{\mathbf{r}}$ を正規化するため、次のような \mathbf{M}_r を用いる。

$$\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & 0.1 \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}.$$

対象物が、Fig. 4 に示す初期状態から最終状態へと動く際の α_{max}^{all} と α_{max} を計算した。結果を Fig. 5 に示す。横軸は Σ_O の z 座標を、縦軸は、 α_{max}^{all} または α_{max} を表している。実線は Fig. 1 で実線で表される作動範囲と \mathcal{S}_{rew}^{elip} を用いたときの結果、破線は Fig. 1 で実線で表される作動範囲と \mathcal{S}_{rew}^{pol} を用いたときの結果、一点破線は Fig. 1 で点線で表される作動範囲と \mathcal{S}_{rew}^{elip} を用いたときの結果を表している。

Fig. 5 から、対象物が z 方向正に移動するにつれ、 α_{max}^{all} が徐々に小さくなるのが分かる。初期状態付近では、各指（特に指 1 と指 3）の姿勢が、各接触点において、どの方向に対しても大きな速度と力を発生できるような状態にあるため、 α_{max}^{all} が大きくなったと考えられる。一方、最終状態付近では、各指

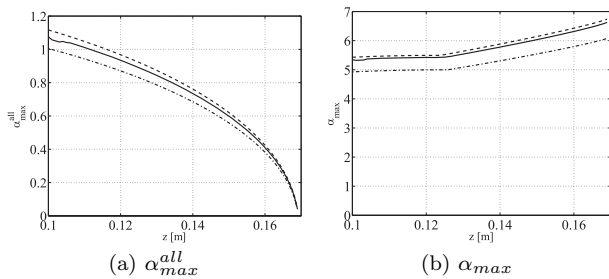


Fig. 5 New manipulability measures (α_{max}^{all} , α_{max}). The rigid line expresses the result when using S_{rew}^{elip} and operation range expressed by the rigid line in Fig. 1, the dashed line expresses the result when using S_{rew}^{pol} and operation range expressed by the rigid line in Fig. 1, and the dot dashed line expresses the result when using S_{rew}^{elip} and operation range expressed by the dot line in Fig. 1

(特に指 2 と指 4) は伸ばしきった姿勢に近い姿勢をとる。この姿勢の場合、手先において、特定の方向に大きな力が発生でき、それ以外の方向ではあまり力が発生できない。速度に関しても同様である。このため、 α_{max}^{all} が小さくなった (0 に近づいた) と考えられる。

他方で、 α_{max} は対象物移動に応じて徐々に増加する。各指が伸長することで、特定の方向に発生可能な対象物速度が大きくなったと考えられる。

S_{rew}^{pol} と S_{rew}^{elip} を用いた場合を比べると、 S_{rew}^{elip} を用いた場合のほうが値が小さい。すべての方向の外レンチをバランスさせる必要がある場合、把持に必要な関節トルクが大きくなるためと考えられる。

作動範囲が Fig. 1 の実線で与えられた場合と点線で与えられた場合とを比べると、実線で与えられたほうが値が大きい。実線で与えられたほうがより関節速度を発生できるような領域を主に用いたためと考えられる。

摩擦の影響をみるため、摩擦係数を $\mu_{ij} = 0.01, 0.1, 0.3$ と変化させた場合について計算した。REWS は S_{rew}^{elip} を用いた。Fig. 6 に結果を示す。Fig. 6 から摩擦の影響が分かる。摩擦係数が大きくなるほど、 α_{max} と α_{max}^{all} の値が大きい。摩擦係数が大きくなると、作用させることができる接触力の範囲が広がる。このため、外力をバランスするのに必要な関節トルクが小さくなり、その結果、発生可能な対象物速度が大きくなったと考えられる。

最後に、計算量について述べる。本研究では、matlab (mathworks) を用いた。使用した PC の CPU は、Intel Core2 Duo P8800 (@2.66 GHz) である。 α_{max}^{all} と α_{max} を同時に計算した場合の CPU 時間は、 S_{rew}^{elip} と Fig. 1 の実線を用いた場合、最大 1.2 [s]、最小 0.19 [s]、平均 0.62 [s]、 S_{rew}^{pol} と Fig. 1 の実線を用いた場合、最大 0.36 [s]、最小 0.094 [s]、平均 0.18 [s]、 S_{rew}^{elip} と Fig. 1 の点線を用いた場合、最大 1.0 [s]、最小 0.16 [s]、平均 0.62 [s] であった。前研究 [14] では、同じシステムで 2 本指のみを用いて物体を把持した場合で、前提案指標の計算に 129 [s] の CPU 時間が必要であった。従来法と比べ、大きく計算量を減らすことができた。

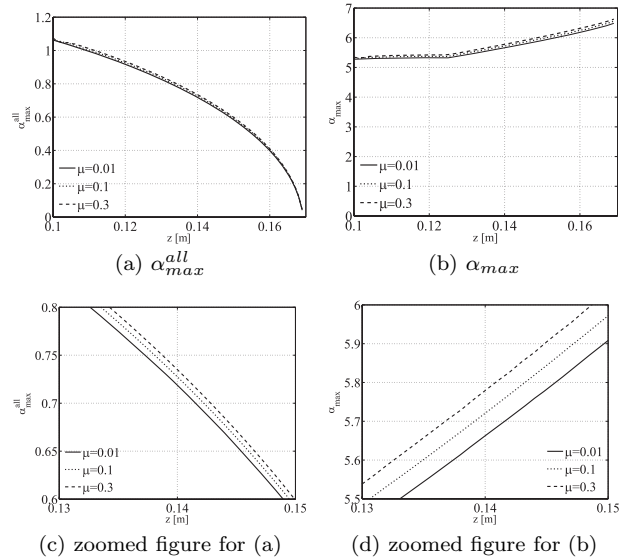


Fig. 6 New manipulability measures (α_{max}^{all} , α_{max}) when changing the frictional coefficient

5. おわりに

本論文では、把持を安定に保ちながら、把持対象物をどれだけ容易に操作できるかを評価するための新しい手法を提案した。把持の安定性と操作性評価を同時に考慮するため、作動範囲を用いた。

まず、要求外レンチ集合 (REWS) を用いて、安定把持に必要な最小の関節トルクを求めた。REWS が凸多面体だけでなく楕円体として与えられる場合についてもその必要関節トルクを導出する方法を提案した。これにより、任意方向の外レンチが対象物に加わる場合を考慮できるようになった。

次いで、得られた最小必要関節トルクと作動範囲より、利用可能 (実際に発生可能な) 最大関節速度を導出した。従来法とは異なり、本手法では、作動範囲が凸でない集合であっても扱うことできる。

最後に、得られた利用可能最大関節速度をもとに、発生可能な対象物速度を評価した。任意方向に発生可能な対象物速度の大きさ、発生可能な最大対象物速度を指標とし、これらの導出法を提案した。

数値例で、本手法の有効性を示すとともに、摩擦の影響を考慮した。

参考文献

- [1] 吉川: ロボット制御基礎論. コロナ社, 1988.
- [2] P. Chiacchio, S. Chiaverini, L. Sciacivco and B. Siciliano: "Global task space manipulability ellipsoids for multiple-arm systems," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.7, no.5, pp.678-685, 1991 correspondence.
- [3] A. Bicchi, C. Melchiorri and D. Balluchi: "On the mobility and manipulability of general multiple limb robots," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, no.2, pp.215-228, 1995.
- [4] A. Bicchi and D. Prattichizzo: "Manipulability of cooperating robots with unactuated joints and closed-chain mechanisms," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.16, no.4,

pp.336–345, 2000.

[5] J.T. Wen and L.S. Wilfinger: “Kinematic manipulability of general constrained rigid multibody systems,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.15, no.3, pp.558–567, 1999.

[6] F.C. Park and J.W. Kim: “Manipulability and singularity analysis of multiple robot systems: A geometric approach,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1032–1037, 1998.

[7] V. Nguyen: “Constructing force-closure grasps,” The International Journal of Robotics Research, vol.7, no.3, pp.3–16, 1988.

[8] V. Nguyen: “Constructing force-closure grasps,” The International Journal of Robotics Research, vol.7, no.3, pp.3–16, 1988.

[9] B. Mirtich and J. Canny: “Easily computable optimum grasps in 2-d and 3-d,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.739–747, 1994.

[10] J. Ponce, S. Sullivan, A. Sudsang, J. Boissonnat and J. Merlet: “On computing four-finger equilibrium and force-closure grasps of polyhedral objects,” The International Journal of Robotics Research, vol.16, no.1, pp.11–35, 1997.

[11] Y. Liu: “Computing n-finger form-closure grasps on polygonal objects,” The International Journal of Robotics Research, vol.19, no.2, pp.149–158, 2000.

[12] X. Zhu, H. Ding and J. Wang: “Grasp analysis and synthesis based on a new quantitative measure,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.19, no.6, pp.942–953, 2003.

[13] T. Watanabe and T. Yoshikawa: “Grasping optimization using a required external force set,” IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol.4, no.1, pp.52–66, 2007.

[14] 渡辺: “把持システムのための関節トルク・速度対ベースド可操作性”, 日本ロボット学会誌, vol.27, no.3, pp.358–367, 2009.

[15] T. Watanabe, Z. Jiang and T. Yoshikawa: ‘Task based hybrid closure grasping optimization for autonomous robot hand,’ Design and Control of Intelligent Robotic Systems. pp.425–451, Springer, 2009.

[16] J. Kerr and B. Roth: “Analysis of multifingered hands,” The International Journal of Robotics Research, vol.4, no.4, pp.3–17, 1986.

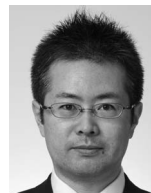
[17] K. Fukuda: cdd/cdd+ Reference Manual. 1999[Online]. Available, http://www.ifor.math.ethz.ch/fukuda/cdd_home/index.html.

[18] C.B. Barber, D.P. Dobkin and H. Huhdanpaa: “The quickhull algorithm for convex hulls,” ACM Transactions on Mathematical Software, vol.22, no.4, pp.469–483, 1996.

付録 A. 記号

| | |
|-------------|--|
| col | : カッコ内要素により構成される列ベクトルまたは行列. |
| diag | : カッコ内要素により構成されるブロック対角行列. |
| N | : 指の数. |
| M_i | : i 番目の指の関節数 ($i = 1, 2, \dots, N$). |
| L_i | : i 番目の指の接触点数. |
| M | : 全関節数 ($= \sum_{i=1}^N M_i$). |
| L | : 全接触点数 ($= \sum_{i=1}^N L_i$). |
| D | : 二次元では 3, 三次元では 6. |
| d | : 二次元では 2, 三次元では 3. |
| Σ_R | : 基準座標系. |
| Σ_O | : 対象物に固定された対象物座標. |
| τ_{ij} | : i 番目の指の j 番目の関節トルク ($j = 1, 2, \dots, M_i, i = 1, 2, \dots, N$). |

| | |
|----------------------------|---|
| q_{ij} | : i 番目の指の j 番目の関節角度 ($j = 1, 2, \dots, M_i, i = 1, 2, \dots, N$). |
| $ \tau_{ij_{max}} $ | : (≥ 0) 関節トルク τ_{ij} の最大絶対値. |
| $ \dot{q}_{ij_{max}} $ | : (≥ 0) 関節速度 \dot{q}_{ij} の最大絶対値. |
| $ \tau_{ijU_{max}} $ | : (≥ 0) 発生関節速度 \dot{q}_{ij} から定まる関節トルク τ_{ij} の最大利用可能絶対値. |
| $ \dot{q}_{ijU_{max}} $ | : (≥ 0) 発生関節トルク τ_{ij} から定まる関節速度 \dot{q}_{ij} の最大利用可能絶対値. |
| \mathcal{S}_{rew}^{pol} | : 凸多面体として与えられた REWS. |
| \mathcal{S}_{rew}^{elip} | : 楕円体として与えられた REWS. |
| \mathbf{w} | : 対象物に作用する合レンチ ($\in \mathcal{R}^D$). |
| \mathbf{w}_{ex} | : 外レンチ ($\in \mathcal{R}^D$). |
| α_{max}^{all} | : あらゆる方向に発生可能な対象物速度の最大値. |
| α_{max} | : 発生可能な対象物速度の最大値. |
| C_{ij} | : i 番目の指の j 番目の接触点 ($j = 1, \dots, L_i, i = 1, \dots, N$). |
| $\Sigma_{C_{F_{ij}}}$ | : C_{ij} に対応する指上の接触点に固定された座標系. |
| $\Sigma_{C_{O_{ij}}}$ | : C_{ij} に対応する対象物上の接触点に固定された座標系. |
| $\mathbf{p}_{I_{ij}}$ | : $\Sigma_{I_{ij}}$ の原点位置 ($I \in \{C_F, C_O\}$) ($\in \mathcal{R}^d$). |
| \mathbf{q}_i | : $= [q_{i1} \ q_{i2} \ \dots \ q_{iM_i}]^T$ ($\in \mathcal{R}^{M_i}$). |
| \mathbf{r} | : Σ_O ($\in \mathcal{R}^D$) の位置姿勢. |
| \mathbf{p}_O | : Σ_O の原点位置 ($\in \mathcal{R}^d$). |
| \mathbf{n}_{ij} | : C_{ij} における対象物内向き単位法線ベクトル. |
| L_{fi} | : i 番目の指の F-point の数. |
| L_{ni} | : i 番目の指の N-point の数. |
| L_{ci} | : $= L_{fi}d + L_{ni}$. |
| $\dot{\mathbf{p}}_{C_i}$ | : $= \text{col}[\mathbf{H}_{ij}\dot{\mathbf{p}}_{C_{F_{ij}}}] = \text{col}[\mathbf{H}_{ij}\dot{\mathbf{p}}_{C_{O_{ij}}}]$. |
| L_c | : $= \sum_{i=1}^N L_{ci}$. |
| $\dot{\mathbf{p}}_C$ | : $= \text{col}[\dot{\mathbf{p}}_{C_i}]$ ($\in \mathcal{R}^{L_c}$). |
| \mathbf{q} | : $= \text{col}[\mathbf{q}_i]$ ($\in \mathcal{R}^M$). |
| $\boldsymbol{\tau}$ | : $= \text{col}[\boldsymbol{\tau}_{ij}]$ ($\in \mathcal{R}^M$). |
| \mathbf{f}_{ij} | : 接触力ベクトル ($\in \mathcal{R}^d$). |
| \mathbf{f} | : $= \text{col}[\mathbf{H}_{ij}\mathbf{f}_{ij}] \in \mathcal{R}^{L_c}$. |
| $\mathbf{t}_{k_{ij}}$ | : C_{ij} における単位接線ベクトル ($k \in \{1, 2\}$). |
| \mathbf{T}_{ij} | : $= [\mathbf{t}_{1_{ij}} \ \mathbf{t}_{2_{ij}}]^T$ ($\in \mathcal{R}^{d-1 \times d}$). 二次元では $[\mathbf{t}_{1_{ij}}]^T$. |
| μ_{ij} | : C_{ij} における摩擦係数. |
| $n_{f_{ij}}$ | : \mathbf{f}_{ij} の法線方向成分 ($= \mathbf{n}_{ij}^T \mathbf{f}_{ij}$). |
| L_v | : $= n_{f_{ric}} \sum_{i=1}^N L_{fi} + \sum_{i=1}^N L_{ni}$. |
| $ \tau_{ij_{mr}} $ | : i 番目の指の j 番目の関節における安定把持のための必要最小関節トルクの絶対値. |
| $\boldsymbol{\tau}_{mr}$ | : $= \text{col}[\tau_{ij_{mr}}]$. |



渡辺哲陽 (Tetsuyou Watanabe)

2003 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年山口大学工学部助手, 2006 年講師, 2007 年金沢大学大学院自然科学研究科講師となり, 現在に至る。博士 (工学)。ロボットハンドやマイクロマニピュレーションなどの研究に従事。IEEE, 日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)