操りタスク精度性能に基づく把持コンフィギュレーション計画*

山脇 輔^{*1}, 八島 真人^{*1}

Grasp Configuration Planning Based on Manipulation Task Accuracy

Tasuku YAMAWAKI and Masahito YASHIMA^{*1}^{*1} Department of Mechanical Systems Engineering, National Defense Academy of Japan
1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa, 239-8686 Japan

The present paper proposes a novel grasp configuration planning for a robotic hand to achieve a specified task with high manipulation accuracy against unknown disturbances. In precision tasks such as a peg-in-hole insertion or a manipulation with a tool, manipulation accuracy of the task coordinate on the grasped target is important. We verify that the effects of unknown disturbances on manipulation task accuracy depend upon the singular vectors and condition number of the manipulation system. It is shown that the manipulation task accuracy can be controlled by changing the grasp configuration appropriately. Then a grasp configuration planning method for precise grasp is proposed by using the above-mentioned measures. The usefulness of the proposed method is shown by simulations concerning a peg-in-hole insertion task.

Key Words : Robot, Robot Hand, Planning, Manipulation Accuracy, Grasp, Disturbance

1. は じ め に

ロボットによる部品の組付けなどの実作業は、一般に、ロボットアームとその先端に取り付けられたロボットハンドとの協調動作によって行われる。この際、ロボットアームはおもに、目標経路に沿ってロボットハンドを大きく移動させるなどの大域動作を、一方、図1に示すようなロボットハンドは、動作は微小であるが、指先で把持した物体やツール（以後、対象物と呼ぶ）を特定方向に精度よく操るなどの局所動作を行うように役割が分担されている。

さて、モデルに基づく操り制御では、操り系の不確かさが、しばしば操りタスク精度の劣化を引き起こす。例えば、経時的・稼働状態によって変化する関節部の摩擦、またはバックラッシュなどは、あらかじめモデル化できない未知外乱としてロボットハンドに作用し、操りタスク精度に影響を与える。

精密な操りを実現するために、未知外乱に対して高い操り精度性能を有する運動や把持を計画することが望まれる。しかし、このような計画手法に関する研究は少ない。著者らはこれまで、ロボットアームの運動に関して、ロボットシステムの出力可制御性に基づいて、手先位置精度の要求される方向の運動が未知外乱に対してロバストとなるようなアーム姿勢を決定する問題について議論し、打撃動作⁽¹²⁾や倣い動作⁽¹³⁾などの大域動作を実現するための軌道計画法を提案した。

ロボットハンドによる局所動作においても同様に、作業タスクに応じて、精度の要求される方向の対象物着目点の運動が、未知外乱に対してロバストとなるように対象物を把持することが望まれる。本論文では、上述の知見⁽¹²⁾⁽¹³⁾を基に、高い操りタスク精度性能を有する把持コンフィギュレーションを決定する問題を考える。

一般に、作業タスクや目的に応じて評価基準を定め、最適な把持コンフィギュレーションが決定される。把持の評価基準としてこれまで、把持する対象物に加わる外乱力に抗する能力⁽²⁾⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾、把持する対象物の可操作性⁽³⁾⁽¹¹⁾、

* 原稿受付 2010 年 7 月 26 日

*1 正員, 防衛大学校システム工学群機械システム工学科 (〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
Email: yashima@nda.ac.jp

Fig. 1 Precision manipulation with tool

把持の安定性⁽⁵⁾⁽⁶⁾, 接触点位置誤差に対する把持のロバスト性⁽¹⁾⁽⁹⁾などに関する研究が行われてきた. 本論文で取り上げる未知外乱に対する操りタスク精度性能は, 従来議論されてこなかった新たな評価基準で, 精密な操りタスクを実現する把持を計画する上で有用となる.

本論文の構成は以下のとおりである. 2章で操り系の基礎式を導出する. 3章で操りタスク精度性能について述べ, 4章で把持コンフィギュレーションの計画手法を示す. 5章で提案手法の具体的な応用例を示した後, 6章で結論を述べる.

2. 操り系の基礎式

2.1 操り系の運動学

ロボットハンドと対象物から構成される3次元操り系を考える. ロボットハンドは各指3関節から成り, 冗長自由度はなく, 対象物は指先で把持されると仮定する. このようなロボットハンドの一例として, 図1に示すような3本指各指3関節で構成されたNDAハンド⁽¹⁴⁾などがある.

基準座標系に対する対象物の重心位置, 姿勢を表すベクトルを $\mathbf{x}_O \in \mathbb{R}^6$, n_f 本指の関節角ベクトルを $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{3n_f}$ とする. 指先が対象物に対して滑らないと仮定すると, 対象物速度 $\dot{\mathbf{x}}_O$ と関節速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ に関して次式

$$\mathbf{W}^T \dot{\mathbf{x}}_O = \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (1)$$

が成り立つ. 各指は3関節をもつので, ヤコビ行列 $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{3n_f \times 3n_f}$ は正方行列となる. $\mathbf{W}^T \in \mathbb{R}^{3n_f \times 6}$ は対象物速度を接触点の速度に関連付けるレンチ行列である.

操りタスクでは, 対象物重心の運動よりむしろ対象物着目点の運動の制御が重要である. ここでは, 着目点のデカルト位置座標をタスク座標 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ とし, 対象物重心の位置姿勢 $\mathbf{x}_O$ に対して次式のように表す.

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}(\mathbf{x}_O) \quad (2)$$

2.2 操り系のダイナミクス

ロボットハンドの運動方程式は次式で与えられる.

$$\mathbf{M}_H \ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}_H + \mathbf{g}_H = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d} - \mathbf{J}^T \mathbf{f} \quad (3)$$

ただし, $\mathbf{M}_H \in \mathbb{R}^{3n_f \times 3n_f}$ は慣性行列, $\mathbf{h}_H \in \mathbb{R}^{3n_f}$, $\mathbf{g}_H \in \mathbb{R}^{3n_f}$, $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{3n_f}$, $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^{3n_f}$, $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{3n_f}$ はそれぞれコリオリ力, 重力, 関節駆動トルク, 未知外乱トルク, ロボットハンドによって対象物加えられる接触力を表すベクトルである.

対象物の運動方程式は

$$\mathbf{M}_O \ddot{\mathbf{x}}_O + \mathbf{h}_O + \mathbf{g}_O = \mathbf{W} \mathbf{f} \quad (4)$$

で与えられる．ただし， $\mathbf{M}_O \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は対象物の慣性行列， $\mathbf{h}_O \in \mathbb{R}^6$ と $\mathbf{g}_O \in \mathbb{R}^6$ はそれぞれコリオリ力，重力を表すベクトルである．

式 (4) の対象物運動を満たす接触力は，

$$\mathbf{f} = \mathbf{W}^\# (\mathbf{M}_O \ddot{\mathbf{x}}_O + \mathbf{h}_O + \mathbf{g}_O) + \mathbf{E} \mathbf{f}_I \quad (5)$$

で表せる．ただし， $\mathbf{W}^\#$ は $\mathbf{W}$ の擬似逆行列， $\mathbf{E}$ は $\mathbf{W} \mathbf{E} = \mathbf{0}$ を満たす任意の行列， $\mathbf{f}_I \in \mathbb{R}^{3n_f-6}$ は内力の大きさを表す任意ベクトルである．

ロボットハンドが特異姿勢でない限りヤコビ行列 $\mathbf{J}$ は逆行列をもつので，式 (1) を時間微分した式を $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ について解くと次式を得る．

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^{-1} (\mathbf{W}^T \ddot{\mathbf{x}}_O + \dot{\mathbf{W}}^T \dot{\mathbf{x}}_O - \dot{\mathbf{J}} \dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (6)$$

式 (5)，(6) を式 (3) に代入すると，ロボットハンドと対象物を含めた操り系全体の運動方程式

$$\mathbf{M}_{\text{sys}} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_O \\ \mathbf{f}_I \end{bmatrix} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d} - \mathbf{h}_{\text{sys}} - \mathbf{g}_{\text{sys}} \quad (7)$$

を得る．ここで， $\mathbf{M}_{\text{sys}}$ ， $\mathbf{h}_{\text{sys}}$ ， $\mathbf{g}_{\text{sys}}$ は，それぞれ操り系全体の慣性行列，コリオリ力項，重力項に相当する．

式 (7) の慣性行列 $\mathbf{M}_{\text{sys}} \in \mathbb{R}^{3n_f \times 3n_f}$ は正方行列となるので，特異でない限り $[\ddot{\mathbf{x}}_O^T \mathbf{f}_I^T]^T$ について一意に解くことができる．

指先と対象物の接触を摩擦あり点接触と仮定すると，指が対象物に対して滑らないように把持を行うために，接触点 i ($i = 1, 2, \dots, n_f$) において接触力が摩擦条件

$$\|\mathbf{f}_{ti}\| \leq \mu_i f_{ni}, \quad f_{ni} \geq 0 \quad (8)$$

を満たすように内力を決定しなければならない．ここで， f_{ni} ， $\mathbf{f}_{ti}$ はそれぞれ，接触法線力と接触接線力ベクトル， μ_i は摩擦係数である．

なお，ロボットハンドは摩擦条件を満たすのに必要な任意の大きさの内力を関節トルクによって作用できるとする．そのために，操り系が force-closure である把持を考える．

3. 操りタスク精度性能

3.1 操り系の線形モデル

関節摩擦・バックラッシュ・予期せぬ外力などのあらかじめモデル化できない不確かさがトルク換算で未知外乱として操り系に加わり，タスク座標の操り精度に影響を与える．本章では，システム制御理論の知見を利用し，この問題を解決する．なお，操り系の物理パラメータは同定によって正確な値が既知とする．

まず，操り系の線形モデルを導出する．未知外乱 $\mathbf{d} = \mathbf{0}$ である式 (2)，(7) を公称モデルとし，平衡点の近傍で線形近似すると，状態変数ベクトルが $\Delta \mathbf{z} = [\Delta \mathbf{x}_O^T \int \Delta \mathbf{f}_I^T dt \Delta \dot{\mathbf{x}}_O^T \Delta \mathbf{f}_I^T]^T$ である状態方程式 (9) と，出力変数ベクトルがタスク座標 $\Delta \mathbf{p}$ である出力方程式 (10) を得る．

$$\Delta \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{z} + \mathbf{B} \Delta \boldsymbol{\tau} \quad (9)$$

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{z} \quad (10)$$

ただし，

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3n_f \times 3n_f} & \mathbf{I}_{3n_f} \\ -\mathbf{M}_{\text{sys}}^{-1} \mathbf{G} & \mathbf{0}_{3n_f \times 3n_f} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3n_f \times 3n_f} \\ \mathbf{M}_{\text{sys}}^{-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{P} \quad \mathbf{0}_{3 \times 6(n_f-1)}]$$

$\mathbf{I}_i$ は i 次単位行列，行列 $\mathbf{0}_{i \times j}$ は $i \times j$ 零行列， $\mathbf{P} = \partial \mathbf{p} / \partial \mathbf{x}_O \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ ， $\mathbf{G} = \partial \mathbf{g}_{\text{sys}} / \partial \mathbf{x}_O$ である．

なお、操り系の線形モデルの導出の詳細は、Bicchi ら⁽⁸⁾の論文を参照されたい。線形モデルが有効であるためには、操り運動が低速であることが条件となるが、精密に対象物を操る場合一般に低速で操ることが多い。

3.2 操りタスク精度性能の評価法

状態変数が $2n$ 個であるシステム (A, B, C) の出力可制御性行列は、

$$N = C \begin{bmatrix} B & A B & \dots & A^{2n-1} B \end{bmatrix} \quad (12)$$

で表され、ある有限時間に加えられた制御入力によって出力可制御となる空間へ写像する。出力可制御性行列の特異値と特異ベクトルを用いて、その制御性能を評価することができる。

さて、操り系の出力可制御性行列は、式 (12) に式 (11) を代入すると得られ、ある有限時間に加えられた関節トルクによって出力可制御となるタスク座標を関係付ける。また、関節トルクのタスク座標に対する影響が最大・最小となる方向は、それぞれ出力可制御性行列の最大特異値 $\sigma_{\max}$ と最小特異値 $\sigma_{\min}$ に対応する特異ベクトルの方向に一致し、互いに直交する。

したがって、関節トルクに未知外乱が含まれる場合、未知外乱の影響が最大となるタスク座標の方向は最大特異ベクトルの方向、一方最小となるタスク座標の方向は最小特異ベクトルの方向となる。

すなわち、未知外乱によって、タスク座標は最大特異ベクトル方向の近傍に沿って分散し、その方向の操りタスク精度は最も悪くなる。逆に、最小特異ベクトル方向へのタスク座標の分散は最も抑えられ、その方向の操りタスク精度は最も良くなる。このように、未知外乱によってタスク座標が分散する方向は特異ベクトルの方向によって決まる。

また、タスク座標分散の収束性の程度は、出力可制御性行列の条件数

$$c = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} \geq 1.0 \quad (13)$$

の大きさによって決まる。条件数が大きいほど、最大特異ベクトル方向への外乱の影響は大きくなるので、タスク座標分散の最大特異ベクトル方向への収束性はより高くなる。逆に、最小特異ベクトル方向への外乱の影響はより小さくなり、タスク座標の分散はさらに抑えられ、その方向の操りタスク精度は向上する。このように条件数は、操りタスク精度の指標を表す。

操りタスク精度性能は特異ベクトルの方向と条件数によって決まると考えられる。ただし、本論文では、関節駆動トルクの大きさに制限はなく、任意の外乱に対して摩擦条件を満たすように適切な内力が指先によって対象物に与えられることを仮定して、内力による操りタスク精度性能への影響はないものとしている。内力は対象物の運動に関与しない接触力成分であるので、上記の仮定のもとで、関節駆動トルクと対象物の運動の関係を表す出力可制御性行列から操りタスク精度性能の評価法を導出している。次節でシミュレーション例を示す。

3.3 シミュレーション例

図 2 は、水平平面内で 2 本指口ボットハンドによる正方形対象物の把持を表す。各指は同じ構造をもつ 2 自由度から成り、冗長性はない。対象物は図 2 に示す位置姿勢にあるとし、対象物重心から y_{c1} , y_{c2} の位置にある左右の接触点位置を変化させる。対象物上辺中点の x , y 座標をタスク座標とする。表 1 に各パラメータを示す。

初期状態で内力が適切に加えられて安定把持状態にある操り系に対して、微小時間 t_f に関節に加えられた外乱トルクによって変位するタスク座標を式 (2), (7) を用いて導出する。この操作を 50 回繰り返し実行し、タスク座標位置の分散を求め、誤差の発生方向およびその収束性について考察する。

なお、外乱トルクは分散 $0.02 \text{ N}^2 \text{ m}^2$ 、平均値ゼロの白色雑音と仮定し、 $t_f = 10 \text{ msec}$ とした。摩擦条件を常に満たし、2 点把持で force-closure⁽⁷⁾が可能となるように内力および接触点位置を与えた。

まず、初期把持コンフィギュレーションが図 3 (a) の場合 ($y_{c1} = 2.0 \text{ cm}$, $y_{c2} = 1.0 \text{ cm}$) を考える。タスク座標位置に記した矢印は、最大・最小特異ベクトルの方向を示す。この操り系に外乱を繰り返し加えたときのタスク座標位置の分散を、図 3 (b) に × 印で示す。図の中心位置はタスク座標の初期位置を、太線と破線の矢印は、それぞれ最大・最小特異ベクトルの方向を示す。タスク座標位置は最大特異ベクトルの近傍に沿って集まり、最小特異ベクトルの方向には分散が抑えられていることが分かる。

Fig. 2 The two-fingered hand grasping a square object

Table 1 Parameter

Object (size and mass)	5.0×5.0 cm, 55.0 g
Link 1 and Link 2	6.5 cm, 3.5 cm
Link's line density	10 g/cm
Friction coefficient: μ	0.5
Internal force: f_I	10 N

図 4 (a) に示すように、接触点位置を変えさせ把持コンフィギュレーションを変えると、特異ベクトルの向きは大きく変化し、条件数は 2.6 から 1.3 に減少した。図 4 (b) に示すように、タスク座標位置は新たな最大特異ベクトルの近傍に沿って分散しているが、条件数が小さくなったので、その収束性は悪くなり、図 3 (b) に比べて、最小特異ベクトル方向にも誤差が広がっている。

以上より、操りタスク精度性能は特異ベクトルの方向と条件数に依存することが、シミュレーションによって確認される。

4. 把持コンフィギュレーション計画

出力可制御性行列は、レンチ行列、ヤコビ行列やハンド慣性行列から構成される。したがって、操りタスク精度性能は、接触点位置やハンド姿勢、対象物の位置姿勢などの把持コンフィギュレーションによって決まる。これは、前節のシミュレーション結果からも明らかである。そこで本章では、把持コンフィギュレーションを適切に変えることで、操りタスク精度性能を制御することを考える。

図 5 にシミュレーション例を示す。これは、図 2 に示す操り系の接触点位置 y_{c1} , y_{c2} を範囲 ± 1 cm、刻み幅 0.25 cm で与えたときに定まる 9×9 組の把持コンフィギュレーションに対する最大特異ベクトルの方向を示す。このように、把持コンフィギュレーションを変えることによって、操り系の動力学的特性・運動学的特性を満たす範囲で、条件数の大きさのみならず、特異ベクトルを任意の方向に制御できる。すなわち、把持コンフィギュレーションによって、操りタスク精度やタスク座標位置誤差の発生しやすい方向と発生しにくい方向を制御できることが分かる。

道具を用いた操りやペグ挿入タスクなどの操りタスクでは、タスク座標の位置精度の要求される方向があらかじめ決められている。精度の要求される方向に対して、誤差が発生しにくくなるように把持コンフィギュレーションを計画すれば、対象物の位置誤差による環境との接触や衝突を極力抑えられ、未知外乱に抗して、操りを確実に実現できると考えられる。

Fig. 3 (a) Grasp configuration with $y_{c1}=2.0$ cm and $y_{c2}=1.0$ cm. (b) Position error distribution.

Fig. 4 (a) Grasp configuration with $y_{c1} = -1.0$ cm and $y_{c2} = 1.0$ cm. (b) Position error distribution.

そこで、操り精度が要求される操りタスクに対して、次の条件を満たすような把持コンフィギュレーションを決定することを提案する。

- 1) タスク座標の位置精度の要求される方向に、最小特異ベクトルの方向を一致させる。
- 2) 条件数をできるだけ大きくさせる。

次章では、提案手法の具体的な適用例を示し、その有用性を示す。

5. 対象物挿入タスクへの応用

対象物を穴に挿入するタスクは、部品の組付け作業に多く現れる作業である。ここでは、2本指ロボットハンドによる対称・非対称形状の対象物の挿入タスクを考え、最適な把持コンフィギュレーションを導出する。

対象とする系を図6に示す。挿入される対象物先端凸部の辺abの中点位置にタスク座標系を取り付ける。挿入される部分の形状は軸対称であるとし、タスク座標系のy軸をその対称軸に一致させる。x軸は右手系を考慮して決める。タスク座標系原点位置の座標をタスク座標にとる。ハンド座標系（基準座標系）を根元関節の中点位置に、対象物座標系を対象物参照点（重心）に取り付ける。

把持コンフィギュレーションを、ハンド座標系に対する対象物座標系の位置姿勢および対象物表面上の接触点

Fig. 5 Change of direction of maximum singular vectors according to the change of grasp configuration

Fig. 6 Peg-in-hole task by two-fingered hand

位置によって表す．本把持コンフィギュレーション計画は、「タスク座標の位置精度の要求される方向（タスク座標系の x 軸方向）に対して，誤差ができるだけ発生しないような対象物位置姿勢および接触点位置を決定する問題」と定義される．なお，導出される把持は，ハンド座標系に対して最適なコンフィギュレーションであるので，タスク座標系の y 軸方向と穴の軸方向が一致するように，ロボットアームでハンドの位置決めを行い挿入タスクを実行する．

対象物の位置姿勢 (x, y, ϕ) の探索範囲はそれぞれ $-0.05 \leq x \leq 0.05$ m, $0.05 \leq y \leq 0.1$ m, $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ rad, 探索刻み幅はそれぞれ 1.0 cm, 1.0 cm, 0.035 rad とした．接触点位置の探索範囲は，辺 ab を除く対象物の各辺とし，探索刻み幅は 0.5 mm とした．ただし，頂点近傍の接触を避けるため，各辺の両端から 5.0 mm 内側の部分は探索範囲から除いた．その他のシミュレーション条件は 3.3 節と同じである．

[例 1] 図 7 (a) に示す長方形対象物の挿入タスクを考える．対象物の大きさ 7.5×2 cm, 質量 33.0 g, その他のパラメータは表 1 の通りである．

図 7 (a) は，導出された最適な把持コンフィギュレーションである．最小特異ベクトルが精度の要求されるタスク座標系の x 軸方向を向くような把持コンフィギュレーションが導出された．長方形対象物はタスク座標系の y 軸

Fig. 7 Case 1. (a) Optimal grasp configuration for rectangular object. (b) Position error distribution.

Fig. 8 Case 2. (a) Optimal grasp configuration for L-shaped object. (b) Position error distribution. $c = 1.9$.

に関して軸対称であるため、最適な把持コンフィギュレーションは左右対称となった。この操り系に外乱を加えたときのタスク座標位置の分散を、図 7 (b) に $\times$ 印で示す。図 7 (a) に記したタスク座標系を同図にも記す。タスク座標系の x 軸方向の分散が抑えられ、挿入タスクに適した把持コンフィギュレーションが決定されたことが分かる。

〔例 2〕 図 8 (a) に示す L 型形状の対象物の挿入タスクを考える。L 型対象物は、例 1 の長方形板および同密度の長方形板 (2×1 cm) からできている。タスク座標系と対象物座標系は例 1 と同じである。

例 1 とは異なり対象物が非対称な形状であるため、図 8 (a) に示すように最適な把持コンフィギュレーションも非対称となった。図 8 (b) に示すように、タスク座標系の x 軸方向の誤差分散は抑えられ、適切な把持コンフィギュレーションが導出された。

〔例 3〕 例 2 と同じ L 型対象物に対して、タスク座標系を図 9 (a) に示すように変えた場合の挿入タスクを考える。図 9 (a) から分かるように、タスク座標系の変化に伴い最適把持コンフィギュレーションも変わる。条件数は 1.9 から 17.9 に大幅に増加した。図 9 (b) から分かるように、図 8 (b) に比べて、タスク座標系の x 軸方向への誤差の発生が改善された。この L 型対象物の場合、図 9 (a) のように把持したほうが高い操り精度で挿入タスクが実現できると考えられる。

Fig. 9 Case 3. (a) Optimal grasp configuration for L-shaped object. (b) Position error distribution. $c = 17.9$.

6. お わ り に

本論文では、以下の3点を明らかにした。

(1) 未知外乱による操りタスク精度への影響は、操り系の特異ベクトルの方向と条件数によって決まることを明らかにした。

(2) 把持コンフィギュレーションを適切に変えることで操りタスク精度性能を制御できることを明らかにし、把持コンフィギュレーションの計画法を示した。

(3) 提案手法を対象物挿入タスクに対する把持コンフィギュレーションの計画に適用し、その有用性を示した。今後の課題として、未知外乱による着目点の姿勢精度に関する検討、環境との接触を伴う場合の検討、NDA ハンドを用いた実機による検証を考えている。

文 献

- (1) Bone, G.M., and Du, Y., "Multi-Metric Comparison of Optimal 2D Grasp Planning Algorithms", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2001), pp. 3061-3066.
- (2) Borst, Ch., Fischer, M. and Hirzinger, G., "Grasp Planning: How to Choose a Suitable Task Wrench Space", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2004), pp. 319-325.
- (3) Chiacchio, P., Chiaverini, S. and Siciliano, B., "Global Task Space Manipulability Ellipsoids for Multiple-Arm Systems", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 5 (1991), pp. 678-685.
- (4) Ferrari, C., and Canny, J., "Planning Optimal Grasps", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1992), pp. 2290-2295.
- (5) Howard, W.S., and Kumar, V., "On the Stability of Grasped Objects", *IEEE Transaction of Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 6 (1996), pp. 904-917.
- (6) Lin, Q., Burdick, J.W., and Rimon, E., "A Stiffness-based quality Measure for Compliant Grasps and Fixtures", *IEEE Transaction of Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 6 (2000), pp. 675-688.
- (7) Nguyen, V-D, "Constructing Force-Closure Grasps", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 7, No. 3 (1988), pp. 3-16.
- (8) Prattichizzo, D., and Bicchi, A., "Dynamic Analysis of Mobility and Graspability of General Manipulation Systems", *IEEE Transaction of Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 2 (1998), pp. 241-258.

- (9) Roa, M.A., and Suarez, R., "Computation of Independent Contact Regions for Grasping 3-D Objects", *IEEE Transaction of Robotics*, Vol. 25, No. 4 (2009), pp. 839-850.
 - (10) Strandberg, M., and Wahlberg, B., "A Method for Grasp Evaluation Based on Disturbance Force Rejection", *IEEE Transaction of Robotics*, Vol. 22, No. 3 (2006), pp. 461-469.
 - (11) 渡辺哲陽, " 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 (2009), pp. 358-367.
 - (12) Yamawaki, T., Tsuzuki, Y., and Yashima M., "Robust Hitting with Dynamic Shaping", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2009), pp. 114-119.
 - (13) Yamawaki, and Yashima M., "Planning Tracking Motion Insusceptible to Unknown Diturbances Using Sensitivity Measure", *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, (2010), pp. 1571-1576.
 - (14) Yamawaki, T., Asano, S., Miyashita, H., and Yashima M., "Robotic Catching with Precision Grasp by Vision", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, (2008), pp. 909-914.
-