

筋肉モデルを用いた把持安定性の評価

京田 文人[†] 渡部 智之[†] 齋藤 豪[†] 中嶋 正之[†]

[†] 東京工業大学大学院情報理工学研究所 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: †{kyota,tomoyuki,suguru,nakajima}@img.cs.titech.ac.jp

あらまし 人間は手を用いて様々な物体を把持し操作を行うが、その際物体の形状や作業目的によって多種多様な手の姿勢が考えられる。物体を把持および操作する手のアニメーションを自動生成するためには、適切な把持および操作姿勢を決定する必要がある。本稿では、人間の手の筋骨格モデルを用いて、与えられた把持姿勢における手の最大発揮力を計算する。そして、把持時の安定性や操作に発揮できる力などを計算し、それによって把持および操作時の手の姿勢を評価する手法を提案する。人間の手の力学的特性を考慮することで、より自然な手の姿勢の選択が可能となると考えられる。

キーワード 把持動作, 把持安定性, 把持解析, 手の筋肉モデル

Grasp Quality Measures Using a Musculoskeletal Model

Fumihito KYOTA[†], Tomoyuki WATABE[†], Suguru SAITO[†], and Masayuki NAKAJIMA[†]

[†] Graduate School of Information Science & Engineering, Tokyo Institute of Technology

Ookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

E-mail: †{kyota,tomoyuki,suguru,nakajima}@img.cs.titech.ac.jp

Abstract In order to generate a grasping animation, we have to determine where and how to grasp the particular object. Therefore, grasp quality measurement is important for grasp planning. We introduce a grasp quality measurement that takes into account physical characteristics of the human hand, because the maximum force that a finger can apply to an object shows dramatic changes for different poses. We use a musculoskeletal hand model to making the grasp wrench space used to compute the stability of a given grasping posture. Moreover, we also introduce task-oriented grasp quality measures including the grasp stability and the ability to apply forces and torques to accomplish a pushing or twisting task.

Key words Grasping Animation, Grasp Quality, Grasp Analysis, Musculoskeletal Hand Model,

1. ま え が き

近年、CGによるキャラクタアニメーションが幅広い分野で用いられており、自動的に自然なアニメーションを生成する手法に関する研究が多く行われている。しかし、人間の手の自由度は非常に高く、対象物体の形状や作業の種類に応じて様々な姿勢をとりうる。把持動作は、物体に対して人間が行う最も基本的な動作と考えられるが、一つの対象物に対して様々な把持方法が考えられるため、自動生成が困難である。

把持を行うためには、対象物のどの部分を、どのように掴むか、すなわち把持位置と把持姿勢を決定する必要がある。筆者らは任意形状の物体に対して安定性を考慮した評価を行い、最適な把持方法を選択する手法を提案

してきた[1]。安定性とは、あらゆる方向から外力が加わること想定し、どの程度の大きさの外力に耐えられるかを表す数値[2]である。

Napier [3]によれば、人間の把持には大きく分けて、安定性を重視する握力把持と、操作性を重視する精密把持の2種類がある。この2大別に基づいてCutkosky [4]はさらに階層的な把持分類を行った。さらに、鎌倉 [5]は日用品がどのように扱われるかを調べ、指の側面を用いる中間把持という第3のカテゴリを提案した。

このように、把持の選択には把持の目的が大きく関わっていると言える。把持目的に対応した適切な把持方法の選択を行うためには、人間の手の特性を考慮した正確な安定性や操作性の評価が必要と考えられる。そのような

正確な把持の評価を行うためには、人間の手の指が発揮できる力を正確に見積もる必要がある。

しかし、人間の手の特性は複雑であり、手の姿勢が異なれば最大発揮力も異なる。そのため、計測によってあらゆる姿勢における発揮力を求めることは容易ではない。そこで本稿では、筋骨格モデルを用いることで任意の姿勢に対して、各接触点において物体に与えることのできる力を計算し、それを用いて把持安定性を評価する手法を提案する。

2. 関連研究

これまで把持動作の生成に関しては、主に四角柱や球体といったプリミティブを対象に研究がなされており [6], [7], 任意の形状から把持位置を決定する研究はあまり行われていない。

そこで、筆者らは任意形状の物体に対して把持可能な部分を抽出し、その部分形状に応じた把持姿勢を学習によって推定する手法を提案した [1]。その結果、多様な形状に応じた把持姿勢を得ることができたが、把持の目的などは一切考慮されておらず、把持の選択は教師データに依存していた。

また、任意形状に対する把持姿勢を求める他の手法として、Shape Matching に基づく手法 [8] が提案されているが、把持の評価は行っていない。

把持評価法として、安定性を計算する手法がロボティクスの分野で一般に用いられている。把持状態とは、外力と把持力がつりあって物体が静止している状態であり、張ら [9] は、「関節トルクが一定のときに把持が耐えられる外力と外モーメントの空間」を限界外力空間と定義した。張ら [10] は摩擦円錐を凸錐で近似し、多面凸集合演算を用いることで限界外力空間の全体像を一度に求めることを提案した。Ferrari と Canny [11] は物体と手の接触点に働く力とトルクを合わせた 6 次元のベクトルを wrench と定義し、物体に加えることのできる wrench 全体の空間を Grasp Wrench Space (GWS) と呼んだ。そして、接触力が 1 に制限された場合の wrench の凸集合体である Unit Wrench Space (UWS) を計算する手法を提案した。著者らの従来手法 [1] でも、UWS による安定性の評価を用いた。

しかし、すべての接触点において発生する最大発揮力を等しいものとして安定性を評価するということは、接触点の数、あるいは接触の方向が偏っていないかを評価するに過ぎない。実際にどれだけ力が発揮できるかを考慮し、GWS を用いて正確な把持評価を行うためには、人間の手の指が発揮できる力を正確に見積もる必要がある。Fu ら [12] は手の筋肉モデルを用いて把持解析を行う手法を提案した。各筋肉に腱に張力を発生させ、指先における各方向に対する発揮力を計算した。しかし、各筋肉の最大張力は姿勢によらず常に一定であった。

そこで本稿では Tsang ら [13] の提案した、より正確な人間の手の筋骨格モデルを用いることで、発揮力の計算を行う。Tsang らのモデルでは、各筋肉の最大張力は姿勢によって変化する。脳からの信号による能動的な筋収縮に対して、Tsang らは動力学シミュレーションを行い、ある動作を与えたときの各筋肉の収縮値を推定した。本稿では手の最大発揮力を求めるために、指先における力を最大にするように収縮値を推定する。

これによって得られた最大発揮力を用いて GWS を計算し、安定性の評価を行う。また、想定される外力などによって要求される力の空間を Task Wrench Space [14] とし、Grasp Wrench Space と比較することで目的に応じた評価を行うことができる。

3. 筋肉モデルを用いた把持力の計算

把持によって物体に作用する接触力を求めるために、手、下腕の筋肉モデルを実装した。骨長、各筋肉の自然長、最大張力、起始と停止の位置、関節軸へのレバーアーム等のデータは [13] を参照した。手の姿勢から筋張力を求め、筋張力から関節トルクを、そして接触点における力を求める。

3.1 筋張力の計算

まずはじめに、関節角度に応じて筋肉長の自然長からの変化を求める。関節がボールジョイントになっており、筋肉の腱が球面上を通っていると仮定すると、筋肉長は角度変化とレバーアームの長さに比例して変化する。自然長が l_0 である筋肉が m 個の関節を通っているとき、長さ l は次式で求めることができる。

$$l = l_0 + \sum_{j=1}^m r_j \Delta\theta_j \quad (1)$$

ここで、 r_j はその筋肉の j 番目の関節におけるレバーアームの長さ、 $\Delta\theta_j$ は休息肢位からの符号付きの関節角度の変化である。

つぎに、筋肉が腱を引っ張る力を求める。筋肉の収縮には脳からの信号によって能動的に収縮するものと、脳からの信号とは無関係に伸長によって自然に収縮するものの 2 種類がある。それぞれの収縮によって発生する力を f^{contract} 、 f^{stretch} とする。筋肉長に対応するそれぞれの力は以下ようになる。

$$f^{\text{contract}}(l) = [1 - 4(l/l_0 - 1.1)^2] f^{\text{max}} \quad (2)$$

$$f^{\text{stretch}}(l) = \begin{cases} 2.77(l/l_0 - 1)^2 f^{\text{max}} & l \geq l_0 \\ 0 & l \leq l_0 \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 l は筋肉長、 l_0 は筋肉の自然長、 f^{max} は筋肉の最大張力を表す。この二つの合力 $f^{\text{muscle}}(l)$ は以下のようになる。

$$f^{\text{muscle}}(l) = c f^{\text{contract}}(l) + f^{\text{stretch}}(l) \quad (4)$$

ここで、 c は脳からの信号による収縮レベルを表す。後述するように、この値は接触点における発揮力を最大にするように求める。

3.2 関節トルクの計算

次に、得られた張力及び筋肉の付着点である起始と停止の位置より各関節に作用するトルクを求める。 M_i 本の筋肉の腱が通過する関節 i における回転軸 \mathbf{z}_i 回りのトルク τ_i は、以下ようになる。

$$\tau_i = \left(\sum_{j=1}^{M_i} \bar{\mathbf{r}}_{i,j} \times (f_j^{\text{muscle}} \bar{\mathbf{u}}_{i,j}) \right) \cdot \mathbf{z}_i \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_{i,j} = \frac{\mathbf{i}_{i,j} - \mathbf{o}_{i,j}}{\|\mathbf{i}_{i,j} - \mathbf{o}_{i,j}\|} \quad (6)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{r}}_{i,j}$ は関節 i における筋肉 j のレバーアームであり、 $\bar{\mathbf{u}}_{i,j}$ は起始 $\mathbf{o}_{i,j}$ から停止 $\mathbf{i}_{i,j}$ へ向かう単位方向ベクトルである。

3.3 把持力の計算

式 (5) により計算した各関節のトルクより各接触点における把持力を計算する。各接触点において、関節トルクによって発生する力を計算する。指 i が接触点 j をもっており、接触点 j を動かす関節の集合を $\mathcal{J}_{i,j}$ とする。関節 k から接触点 j へのベクトルを $\mathbf{p}_{j,k}$ 、関節 k の回転軸の単位ベクトルを \mathbf{z}_k とすると、接触点に働く力の方向は $(\mathbf{p}_{j,k} \times \mathbf{z}_k)$ であり、その大きさはトルク τ_k をモーメントアーム $\mathbf{p}_{j,k}$ の長さで割ったものとなる。すなわち、接触点 j に働く接触力は次式で表される。

$$\mathbf{F}_j^{\text{contact}} = \sum_{k \in \mathcal{J}_{i,j}} \frac{\tau_k}{\|\mathbf{p}_{j,k} \times \mathbf{z}_k\|^2} (\mathbf{p}_{j,k} \times \mathbf{z}_k) \quad (7)$$

把持の方向ベクトルを \mathbf{d}_j とすると、把持力 F_j は次式で求められる。

$$F_j = \mathbf{F}_j^{\text{contact}} \cdot \mathbf{d}_j \quad (8)$$

通常 \mathbf{d}_j は物体表面の内向き法線ベクトルを用いるが、タスクによって加えるべき力の方向が指定されている場合はその方向に置き換えることで、指定された方向への把持力を求めることができる。

3.4 最大把持力の計算

ここまでの計算によって求められる把持力を最大化する筋肉の収縮値 $\mathbf{C} = (c_1, \dots, c_{N_M})^T$ を求める。 N_M は筋肉の数であり、本稿で用いたモデルでは総指伸筋、浅指屈筋、深指屈筋を各指ごとに独立に扱っているため、 $N_M = 41$ となる。式 (4) は $\mathbb{F}^m = (f_1^{\text{muscle}}, \dots, f_{N_M}^{\text{muscle}})^T, \mathbb{F}^c = \text{diag}(f_1^{\text{contract}}, \dots, f_{N_M}^{\text{contract}}), \mathbb{F}^s = \text{diag}(f_1^{\text{stretch}}, \dots, f_{N_M}^{\text{stretch}})$ を用いて

$$\mathbb{F}^m = \begin{bmatrix} \mathbb{F}^c & \mathbb{F}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

と表される。同様に式 (5) を行列として表す。 N_F を指の数、 L_i を指 i の関節数、関節 j を通過する腱の数を M_j 、 $L = \sum_{i=1}^{N_F} L_i$ 、 $M = \sum_{j=1}^L M_j$ とすると、 $\mathbf{T} = (\tau_1, \dots, \tau_L)^T$ は以下ようになる。

$$\mathbf{T} = \mathbf{Z} \mathbf{T}^u \mathbb{I}^m \mathbb{F}^m \quad (10)$$

$$\mathbf{T}^u = \begin{bmatrix} \bar{\tau}_{1,1}^u \cdots \bar{\tau}_{1,M_1}^u & & & 0 \\ & \bar{\tau}_{2,1}^u \cdots \bar{\tau}_{2,M_2}^u & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \bar{\tau}_{L,1}^u \cdots \bar{\tau}_{L,M_L}^u \end{bmatrix} \in R^{3L \times M} \quad (11)$$

$$\bar{\tau}_{i,j}^u = \bar{\mathbf{r}}_{i,j} \times \bar{\mathbf{u}}_{i,j} \quad (12)$$

ここで $\mathbf{Z} = \text{diag}(\mathbf{z}_1^T, \dots, \mathbf{z}_L^T) \in R^{L \times 3L}$ であり、 $\mathbb{I}^m \in R^{M \times N_M}$ はその要素 $I_{i,j}$ が、筋肉 j が腱 i に作用する場合 1、そうでない場合 0 となる行列である。

指 i の接触点の数を K_i 、 $K = \sum_{i=1}^{N_F} K_i$ とすると、式 (7,8) は以下の式で表される。

$$\mathbb{F} = \mathbb{D} \mathbb{J}' \mathbf{T} \quad (13)$$

$$\mathbb{J}' = \text{diag}(\mathbb{J}'_1, \dots, \mathbb{J}'_{N_F}) \in R^{3K \times L} \quad (14)$$

$$\mathbb{J}'_i = \begin{bmatrix} \mathbb{J}'_{i,1} \\ \vdots \\ \mathbb{J}'_{i,K_i} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbb{J}'_{i,j} = \begin{bmatrix} \mathbb{J}'_{i,j,1} & \cdots & \mathbb{J}'_{i,j,L_i} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbb{J}'_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{\mathbf{p}_{j,k} \times \mathbf{z}_k}{\|\mathbf{p}_{j,k} \times \mathbf{z}_k\|^2} & \text{if } k \in \mathcal{J}_{i,j} \\ \mathbf{0} & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

ここで $\mathbb{D} = \text{diag}(\mathbf{d}_1^T, \dots, \mathbf{d}_K^T) \in R^{K \times 3K}$ である。

式 (9, 10, 13) より、収縮値と把持力は次のような線形な関係であることがわかる。

$$\mathbb{F} = \mathbf{A} \mathbf{C} \quad (18)$$

そのため、把持力に関して収縮値を最適化することが可能である。

4. 筋骨格モデルの評価実験

筋骨格モデル中の筋肉の最大張力は筋肉間の相対値であるため、絶対値を得るために実測した把持力との比較を行った。シート状の圧力センサを用いて実際の把持時における接触点の把持力を計測した。

直径 40mm の円柱を対象に各指先の最大把持力を計測した。被験者は 20 代男性 5 名であり、計測は各指ごとに 5 回ずつ行い平均した。図 1 にその結果を示す。左から母指、示指、中指、環指、小指の把持力を示しており、縦

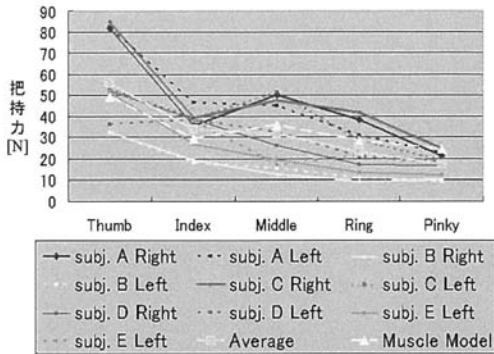


図 1 指先の把持力

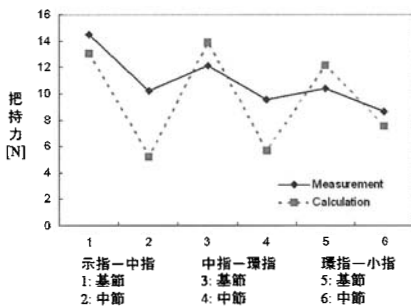


図 2 内転把持時の把持力

軸が把持力の大きさ [N] を表している。そして、全ての被験者の平均値と、筋骨格モデルの計算値との二乗誤差を最小化するように係数を求め、計算値をスケールした。スケール係数は全ての指で同一のものを用いた。

そして、2本の指の側面で物体を挟む内転把持の計測結果と比較を行った。直径 10mm の円柱を対象に、示指と中指、中指と環指、環指と小指を用い、それぞれ基節と中節の 2 箇所において、計 6 種類の把持を計測し、比較を行った。図 2 は左から順に、示・中指による基節における把持、中節における把持、中・環指による基節、中節における把持、環・小指による基節、中節における把持となっている。計算値は指先の把持力で計算した係数を用いてスケールしており、指の屈曲と内転の発揮力の比が正しく算出されていることが確認できた。

本実験において、実測値と計算値と同様な傾向が得られた。すなわち、本稿で実装した筋骨格モデルが、非常に複雑な人間の手の機構をモデル化できており、任意の把持姿勢に対してその把持力を求めることが可能であることが示された。

5. 筋肉モデルを用いた安定性の評価

筋肉モデルにより、任意の姿勢において各接触点に加

えられる力を計算することが可能となるため、これを用いて安定性の評価を行う。

手が物体に及ぼすことのできる力とモーメントの空間を Grasp Wrench Space (GWS) と呼ぶ [11]。接触点 i における摩擦錐の j 番目の稜線に沿った wrench ベクトルを $w_{i,j}$ とすると、GWS は次式のように凸包体として計算される。

$$W_A = \text{ConvexHull} \left(\bigoplus_{i=1}^n w_{i,1} \cdots w_{i,m} \right) \quad (19)$$

上式では、各接触点の力の発揮レベルの合計が常に一定に制限されていると仮定している。各接触点において独立に力を発揮できるとすると、GWS は以下のようにミンコフスキー和で表されるため、計算量が問題となる。

$$W_B = \text{ConvexHull} \left(\bigoplus_{i=1}^n w_{i,1} \cdots w_{i,m} \right) \quad (20)$$

そこで、本稿では接触点の少ない精密把持に関しては W_B を、接触点の多い握力把持に関しては W_A を用いる。

この凸包体に内接し、原点を中心とする球の半径により、方向に関わらずどの程度の外力に耐えられるかを計算することができる。また、この内接球を任意の形状の Task Wrench Space (TWS) [14] に置き換えることで、目的に応じた安定性の判定を行うことができる。

筋肉モデルを用いて人間の把持力を考慮した場合の安定性の評価結果の例を示す。ここでは、図 3 に示す 4 種類の把持について評価を行った。人間の把持力を考慮せず全ての接触力を 1 とする UWS と、筋肉モデルを用いて計算した最大把持力を用いた GWS の 2 種類のレンチスペースによって安定性を評価した。安定性の評価結果を表 1 に示す。本手法では、手と物体の接触点を各指節に一つずつ配置された仮想的な球に限定しており、図 3 において接触点に摩擦錐を表示している。摩擦錐の大きさは筋肉モデルによって計算された把持力によって異なっている。

把持タイプ (a), (b) はともに扁平な物体の上下 2 点で接触する把持である。(a) は母指と示指の末端で把持を行う精密把握、(b) は母指末端と示指機側面によって把持を行う側面把握である。(a) と (b) の接触点の位置はほぼ同じであるため、UWS ではこの 2 つを区別することができない。一方、GWS による評価では、(b) の方がはるかに安定性が高くなっている。(a) において示指の筋肉による把持力は母指よりも弱い。(b) の示指機側面においては、示指の内転可動域の限界に達して機構的に固定されているため、筋力ではなく骨格による抗力として大きな力を発生させている。

把持タイプ (c), (d) はともに円柱形の側面を把持している。(c) は母指、示指、中指を用いた包囲屈曲把握であり、(d) は (b) と同じく側面把握に相当する。把持力を考慮しない場合、(c) は接触点が 3 点であるため、他の 2

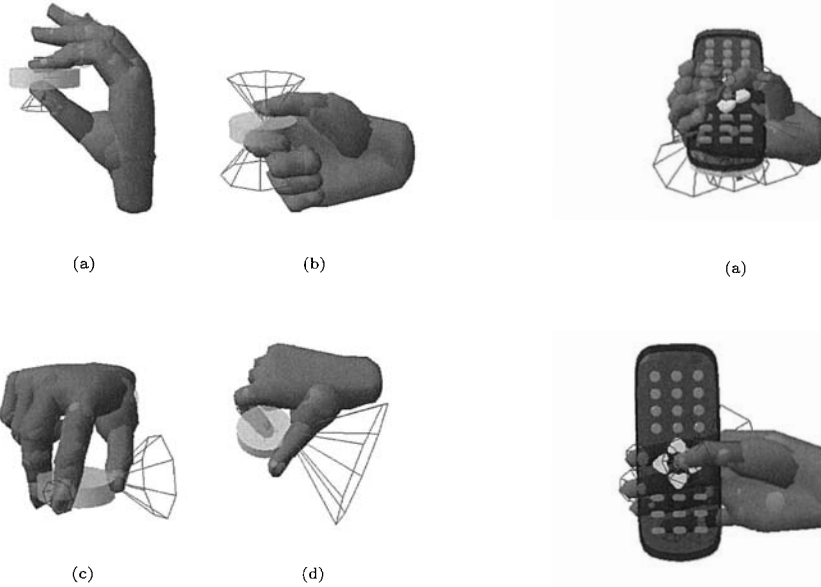


図3 4種類の把持姿勢

表1 図3に対する把持安定性の評価結果.

| 姿勢 | 安定性 (UWS) | 安定性 (GWS) |
|----|-----------|-----------|
| a | 0.137 | 0.227 |
| b | 0.156 | 0.470 |
| c | 0.776 | 0.176 |
| d | 0.420 | 0.861 |

点接触による把持よりもはるかに大きな安定性となって
しまう。中指は接触点が側面であるため、内転によって
把持力を発生させているため、他の接触点より把持力が
弱く、その結果 GWS の安定性が下がっている。

このように、筋骨格モデルによって把持力を計算するこ
とで、より自然な把持の評価を行うことが可能となった。

6. 操作に応じた把持の評価

物体を把持し、操作を行うための力を発揮することが
できるかを評価する。本稿では「押す」「回す」という2
種類の操作を対象として把持の評価を行う。「押す」操作
の場合にはユーザは物体中の押す位置と力を加える方向
を指定する。「回す」操作の場合にはユーザは回転軸を指
定する。筋骨格モデルで計算した発揮力を用いて操作を
行う力を評価する。

6.1 「押す」

テレビのリモコンや携帯電話など、物体を把持しなが
らボタンを押す操作を行う際には、ボタンを押す力によ
って安定性が失われないように、他の指で支える必要があ
る。そこで、操作する指が加える力と、物体にかかる重

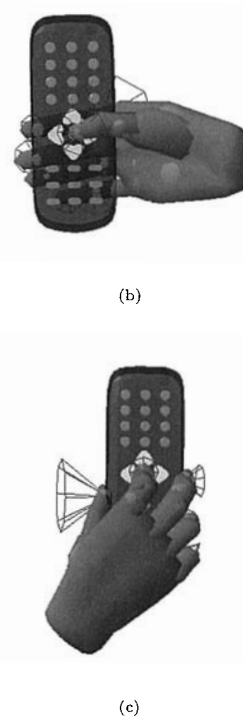


図4 リモコンに対する操作姿勢

力を外力とした Task Wrench Space(TWS) が GWS に
含まれているかを判定し、把持の評価を行う。

図4にリモコンを把持しながら中央のボタンを押す場
合の3種類の操作姿勢を示す。これらについて、物体に
対して安定を保ったまま加えることのできる最大操作力
と耐えられる最大重量の評価を行った結果を表2に示す。
最大操作力については、安定性を考慮しない場合の最大
発揮力に対する割合も示している。姿勢(a)は握力把持
を行っており、安定性は高いが、操作を行う母指の姿勢
に無理があるため発揮力が低く、最大操作力は(b)に劣っ
ている。

6.2 「回す」

ペットボトルのキャップを開けるときなど、物体をある

表2 図4に対する把持の評価.

| 姿勢 | 安定性 | 最大操作力 [N] | 最大操作力 [%] | 最大重量 [kgf] |
|----|-------|-----------|-----------|------------|
| a | 0.961 | 21.1 | 100 | 2.9 |
| b | 0.922 | 26.1 | 58 | 1.2 |
| c | 0.365 | 9.51 | 32 | 1.0 |

回転軸を中心に回転させるタスクについて、指の発揮力から発生させることの出来るトルクを計算する.

まず、各接触点において、回転軸周りのトルクを発生させるための接線方向を計算し、それを式(8)における \mathbf{d} として把持力の最適化を行う. ただし、接線方向に力を加えるためには法線方向の力による摩擦力が必要となる. そのため、式(8)に次のような制限を加える.

$$F_j = \min \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{F}_j^{\text{contact}} \cdot \mathbf{d}_j \\ \mu \mathbf{F}_j^{\text{contact}} \cdot \mathbf{n}_j \end{array} \right. \quad (21)$$

図3(c),3(d)の把持姿勢について、円柱の中心軸周りに各指が発生させることのできるトルクを計算したところ、表3のようになった.

表3 図3の各指の操作トルクの評価

| 姿勢 | 母指 | 示指 | 中指 | 合計 [Nm] |
|----|-------|-------|-------|---------|
| c | 0.217 | 0.067 | 0.107 | 0.391 |
| d | 1.40 | 0.225 | — | 1.625 |

7. まとめと今後の課題

筋骨格モデルに基づいて、任意の姿勢における最大把持力を計算することで、人間の手の特性を考慮した安定性の評価を行う手法を提案した. さらに、把持の目的に応じた評価を行うために、操作を行う際の把持安定性の評価、操作性の評価を行った. 物体を把持しながら押す操作、物体をある軸周りに回す操作に関して、物体に加えることのできる最大操作力を評価した. 提案手法により、より自然な把持の評価が可能となり、適切な把持および操作時の手の姿勢の選択を行えるようになった.

今後の課題としては、人間は常に最大の力を出しているわけではないため、適切な発揮力を評価する必要があると考えられる. また、筋肉の発揮力には個人差が大きいため、それを考慮した筋肉モデルの調整を行いたい. さらに、静的に加える力のみでなく、動的に物体を操作する場合に必要な力を計算することで、姿勢の自然さのみでなく、動作の自然さを考慮に入れた把持の評価が可能となると考えられる. そのような把持の評価を行うことによって、アニメーションの自動生成やヒューマノイドロボットの実現といった応用のみでなく、より扱いやすい道具の設計支援にも役立てることができると考える.

8. 謝辞

本研究は21世紀COEプログラム「大規模知識資源の体系化と活用基盤構築」(代表者古井貞照)の補助によって行われた.

文 献

- [1] F. Kyota, T. Watabe, S. Saito and M. Nakajima: "Detection and evaluation of grasping positions for autonomous agents", Proceedings of 2nd International Workshop on Language Understanding and Agents for Real World Interaction (LUAR 2005), pp. 453-460 (2005).
- [2] A. T. Miller and P. K. Allen: "Examples of 3d grasp quality computations", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 1240-1246 (1999).
- [3] J. R. Napier: "The prehensile movements of the human hand", J. Bone and Joint Surgery, **38B**, 4, pp. 902-913 (1956).
- [4] M. R. Cutkosky: "On grasp choice, grasp models and the desing of hands for manufacturing tasks", IEEE Transactions on Robotics and Automation, **5**, 3, pp. 269-279 (1989).
- [5] 鎌倉矩子: "手のかたち手のうごき", 医歯薬出版 (1989).
- [6] R. Mas and D. Thalmann: "A hand control and automatic grasping system for synthetic actors", Proceedings of Eurographics '94, pp. 167-178 (1994).
- [7] A. T. Miller, S. Knoop, P. K. Allen and H. I. Christensen: "Automatic grasp planning using shape primitives", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 1824-1829 (2003).
- [8] Y. Li and N. S. Pollard: "A shape matching algorithm for synthesizing humanlike enveloping grasps", IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2005), IEEE, pp. 442-449 (2005).
- [9] X. Y. Zhang, Y. Nakamura, K. Goda and K. Yoshimoto: "Robustness of power grasp", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 2828-2836 (1994).
- [10] X. Y. Zhang, Y. Nakamura and K. Yoshimoto: "Mechanical analysis of grasps with defective contacts using polyhedral convex set theory", Robotics Society of Japan, **14**, 1, pp. 105-113 (1996).
- [11] C. Ferrari and J. Canny: "Planning optimal grasps", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 2290-2295 (1992).
- [12] J. L. Fu and N. S. Pollard: "On the importance of asymmetries in grasp quality metrics for tendon driven hands", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 1068-1075 (2006).
- [13] W. Tsang, K. Singh and E. Fiume: "Helping hand: An anatomically accurate inverse dynamics solution for unconstrained hand motion", ACM/Eurographics 2005 Symposium on Computer Animation, pp. 319-328 (2005).
- [14] C. Borst, M. Fischer and G. Hirzinger: "Grasp Planning: How to Choose a Suitable Task Wrench Space", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 319-325 (2004).