

手の筋骨格モデルを用いた把持安定性及び操作性の評価

渡部 智之¹ 京田 文人¹ 齋藤 豪¹ 中嶋 正之^{1,2}

¹ 東京工業大学 大学院 情報理工学研究所

² 国立情報学研究所

1 はじめに

手は非常に高い自由度を有するため、人間の動作を自動的に生成する際の大きな課題となっている。様々な物体に対して自動的に人間らしい把持・操作姿勢を求めることができれば、アニメーション制作のみならず工業製品の設計支援などに非常に有用であると考えられる。人間はより安定し操作しやすい姿勢を無意識に選択していると考えられるため、把持・操作時における安定性及び操作性の意識的な評価は逆に難しい。しかも手の機構は複雑であり、姿勢によって発揮できる力が異なるため手のモデルをレンダリングするだけでは不十分である。そこで本研究では、人間の手・前腕の筋肉モデルを用いることで任意の姿勢における最大発揮力を計算し、それに基づいて把持安定性及び操作性の評価を行う手法を提案する。

2 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、下腕に筋肉モデルを構築する。骨長、筋肉長、筋肉の最大発揮力、筋肉の付着位置、関節軸から力の作用点の距離であるレバーアームのデータを参照した [1]。まずはじめに、関節角の変化に応じて収縮する筋肉長を求め、筋肉長から筋肉の発揮力を求める。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_{contr} 、 $F_{stretch}$ とする。筋肉長に対応するそれぞれの力は以下のようになる [1]。

$$\mathbf{F}_{contr}(l) = [1 - 4(l/l_0 - 1.1)^2] \mathbf{F}_{max} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_{stretch}(l) = \begin{cases} 2.77(l/l_0 - 1)^2 \mathbf{F}_{max}, & l \geq l_0 \\ 0, & l \leq l_0 \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 l は筋肉長、 l_0 は筋肉の自然長、 \mathbf{F}_{max} は筋肉の最大発揮力を表す。この二つの合力 $\mathbf{F}(l)$ は以下のようになる。

$$\mathbf{F}(l) = c\mathbf{F}_{contr}(l) + \mathbf{F}_{stretch}(l) \quad (3)$$

次に、得られた発揮力及び筋肉の付着点より各関節に作用するトルクを求める。 m 本の筋肉が通過する関節 i におけるトルク τ_i は、以下のようになる [1]。

$$\tau_i = \sum_{j=1}^m \mathbf{r}_{i,j} \times \mathbf{F}_{i,j} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{r}_{i,j}$ 、 $\mathbf{F}_{i,j}$ はそれぞれ関節 i における筋肉 j のレバーアーム及び筋肉の発揮力を表している。

式 (4) により計算した各関節のトルクより把持力、すなわち各接触点における接触力を計算する。把持力の計算法は精密把持、握力把持によって異なる。精密把持における計算法 [2]、握力把持における計算法 [3] を用い計算を行なう。

3 把持安定性の評価

得られた把持力を用いて、把持安定性の評価を行う。把持安定性の評価としては、Grasp Wrench Space(GWS)を用いた手法が広く用いられている [4]。GWS とは把持によって手が物体に及ぼすことのできる力とモーメントの6次元空間である。GWS は以下のように求められる。

まず物体と物体の接触点における垂直抗力ベクトルを f_{\perp} とする。最大静止摩擦係数によって静止が保障される接触力の集合は、図1のように、これを軸とし、軸と稜線のなす角が $\tan^{-1} \mu_s$ の円錐になる。 μ_s は最大静止摩擦係数である。ここで、図1のように、円錐を凸多角錐に近似する。本稿では、8本の稜線を持つ凸多角錐に近似している。凸多角錐を用いて、物体に作用する力 f は式 (5) で与えられる。

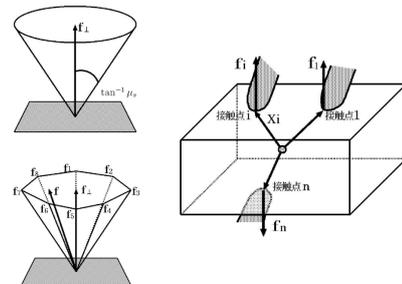


図 1: 摩擦錐の近似及び凸包体の構築

$$\mathbf{f}_i \approx \sum_{j=1}^m \alpha_{i,j} \mathbf{f}_{i,j}, \quad \alpha_{i,j} \geq 0, \quad \sum_{j=1}^m \alpha_{i,j} = \|\mathbf{f}_{\perp}\| \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{f}_{i,j}$ は接触点 i における凸多角錐の稜線 j に沿ったベクトルである。次に、 $\mathbf{f}_{i,j}$ と $\mathbf{f}_{i,j}$ に沿った重心

を中心とするモーメントを合わせた6次元の空間 $w_{i,j}$ を構築する．さらに式7によりGWS W を凸包体として構築する．

$$w_{i,j} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_{i,j} \\ (\mathbf{d}_i \times \mathbf{f}_{i,j}) \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$W = \text{ConvexHull}(\cup_{i=1}^n w_{i,1}, \dots, w_{i,m}) \quad (7)$$

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，これを把持安定性とする．また，この内接球を任意の形状の Task Wrench Space (TWS)[5] に置き換えることで，操作を考慮した安定性の評価を行うことができる．TWS の定義及び操作を考慮した安定性の評価については次節で述べる．

4 操作を考慮した把持安定性・操作性の評価

前節まででは，把持による安定性について述べてきたが，物体を操作する際には，操作によって把持安定性が失われないかを判定する必要がある．そこで，物体を操作する際に物体に加わる力とモーメントにより作られる空間及び物体に加わる重力や加速度により作られる空間の集合を Task Wrench Space(TWS) とする．TWS が GWS に含まれているかを計算することで，操作時において把持安定性が失われていなかを判定する．なお，GWS には操作による力及びモーメントは加えないものとする．

図2に示すように，図2(a)に示すリモコンを把持し，親指または人差し指の先端で図2(a)において赤色で表示されているボタンを垂直方向に押す操作をする把持において，操作性を考慮した把持安定性・操作性の評価結果を表1に示す．なお，重力は図2(a)に示す座標軸において $-Y$ 方向に働いているものとする．

まず安定性を評価する指標としてそれぞれGWS による把持安定性に加え，把持安定性が失われない限界の操作力の大きさを示す．

また，操作性を表す指標として，動的可操作度 [6] を用いる．動的可操作度とは，各関節のトルクを用いて実現しうる手先加速度の集合の体積である．操作を行う指に対し，動的可操作度を計算する．

表 1: 操作を考慮した安定性の評価結果

把持	把持安定性	抗操作力限界	動的可操作度
b	0.9797	0.5659	1.087
c	0.6845	0.5276	1.464
d	0.4913	0.3082	0.3150

把持 (b) と (c) はともに親指の先端で操作を行っており，(b) は手の平全体を広く使い物体を囲むように把持を行い，接触点も多い．一方 (c) では手の平の一部を用い浅く把持を行っており，接触点は物体の背面及び側面に偏っている．そのため，把持安定性，操作力に対する抗力は (b) の方が大きく，(b) の方が安定性が高い．一方 (c) は (b) よりも動的可操作度が大きい．以上より安定性においては (b) の方が優れているが，操作性においては (c) の方が優れていることが分かる．

次に把持 (b)，(c) と把持 (d) について比較を行う．(d) は人差し指の先端で操作を行っている．(d) は (b)，(c) に比べ，把持安定性及び操作力に対する抗力が小さ

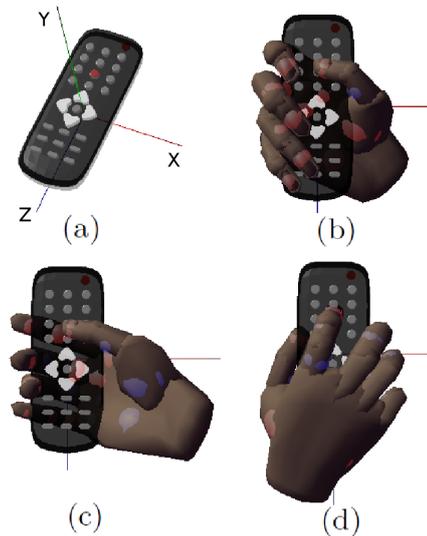


図 2: 操作を考慮した把持

い．これは物体との接触点が物体の端に偏っており，さらに物体背面に接触点がないためだと考えられる．また動的可操作度の値も (b)，(c) に比べ大きく劣っている．(c) の把持は安定性・操作性の両面において，(b)，(c) に劣ることが分かる．

これらの結果は人間が直感的に感じる把持安定性・操作性の結果に近いものと考えられる．そのため，本稿で提案した，筋骨格モデルによる把持力の計算に基づいた把持安定性・操作性の評価が人間らしい把持・操作姿勢の生成に非常に有用であると考えられる．

5 まとめと今後の課題

本稿では，筋骨格モデルに基づいて，任意の姿勢における最大発揮力を計算することで，人間の手の特性を考慮した把持安定性及び操作性の評価を行う手法を提案した．今後は把持・操作姿勢における評価だけではなく，把持・操作動作に対し，その動作の安定性・操作性を評価することを目標とする．

参考文献

- [1] Winnie Tsang, Karan Singh, Eugene Fiume: "Helping hand: An anatomically accurate inverse dynamics solution for unconstrained hand motion. ", In SCA '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, ACM Press, 319-328.
- [2] 張曉毅, 中村仁彦, 吉本堅一: "不完全な接触をもつ把持の力学的多面凸解析", 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp.105-113, 1996.
- [3] 張曉毅・中村仁彦・吉本堅一: "パワーグラスを含む一般的な把持とあやつりの力学", 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.2, pp.45-53, 1997.
- [4] C. Ferrari and J. Canny.: "Planning Optimal Grasps. ", In Proceedings of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pages 2290-2295, Nice, France, May 1992.
- [5] 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, New Orleans, LA, USA, IEEE, pp. 319-325 (2004).
- [6] A.Liegeois: "Automatic Supervisory Control of the Configuration and Behavior of Multibody Mechanisms ", IEEE Trans. SMC-7, 12, pp.868-871(1977).