

1. はじめに

工業製品等の設計において、CAD/CAM/CAE が多く利用されている。設計段階で製品の強さ・変形・振動・安定性・信頼性などを数値計算によって解析し、これをもとに設計にフィードバックし修正や変更を行っている。人間が使うような製品の場合、製品に関してはこのようなことが行われているが、それを使うべき人間に対して、どのような力が働いているか、あるいは外力がどのように影響するかなどということまでは考慮されていない。

例えば、図1のような人間が握る製品の設計を考えた場合、握りやすさをどのように評価すればよいのだろうか。実際に製品をつくりそれを人間が評価する方法もあるが、CAD/CAM/CAE を使い、設計段階で評価するほうが効率的である。そこで、人間に働く力がこれを評価する手段の一つとすることができるであろう。

本研究では、骨・軟組織・皮膚を含めた人体モデルを考え、その運動、変形、力の解析を行うことを目的とする。前報¹⁾では、母指を除く指(Finger)についての屈曲動作に伴う組織の変形シミュレーションを行った。

本報では、母指(Thumb)の運動とその変形について報告する。

2. 親指(母指)の機能

人間の手指は大変複雑な機械であり、ほとんど無限に近いあらゆる運動をもった構成体であり、5本の指が相互に作用することによって動作する。人間が猿や霊長類と違う点は、母指の機能の有無にあるといわれ、親指を除く4指は独立に屈曲・伸展を行う以外に約±15度の側屈運動を行うことができる。

母指は5本の骨—舟状骨(S)、大菱形骨(T)、中手骨(M)、2つの指節骨(P1, P2)一と、4つの関節—指節間関節(IP)、中手指節関節(MP)、手根中手関節(TMまたはCMC)、舟状骨と大菱形骨間の手根間関節(ST)一からなる(図2)。

ST関節がおもに手首に柔軟さを与えるために小さな運動しかしなくて、母指の運動にほとんど関与していないとすれば、関節の数を実際上3つに減らすことができる。舟状骨と大菱形骨は残りの指が機能する基底となる。

母指は、MP関節とTM関節の動きに特徴があり、その運動は、

- ①対立運動(母指と小指とが向かい合う運動)
- ②内・外転運動(中指に近づいたり、遠ざかる運動)
- ③屈曲・伸展運動

が基本となっており、特に対立運動が重要である。

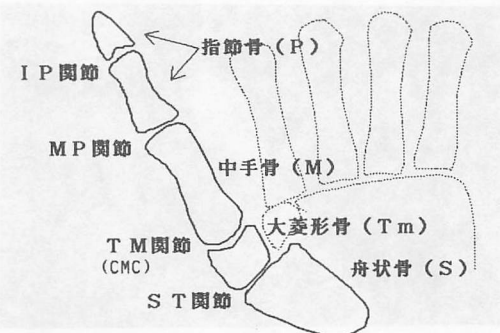


図2 母指の骨と関節

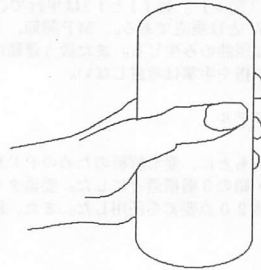


図1 人間が握る製品の例

3 対立運動のメカニズム²⁾

母指の特徴である対立運動は、3つの関節で生じる運動が相互に作用しあってなされている(図4参照)。

a) TM (CMC) 関節

母指の関節のうち最も重要な関節であり、対立運動に必要である親指の縦軸について起こるほとんどの回転に関与する。

2軸2自由度もち、回転は2つの軸の回転について同時にあるいは次々に起こる回転の複合である。第1中手骨の軸 XX' は、MP関節の屈曲伸展軸 $f1$ とIP関節の屈曲伸展軸 $f2$ に対して直角である。

b) MP関節

理論上3つの軸をもち3自由度ある(図3)。

- 1. 軸 $f1$: 純粋な屈曲
- 2. 軸 $f1'$: P1の回外運動を伴う屈曲
- 3. 軸 $f1''$: P1の回内運動を伴う屈曲

しかし、2と3が同時に起こることはなく、実際はこのうち1~2自由度となる。1自由度は主として屈曲と伸展に対してであり、2自由度は縦回転と偏りに対してである。また母指と手掌のグリップの固定に関与する。

また、母指の先端で起こる大部分の縦回転はMP関節から生じる。

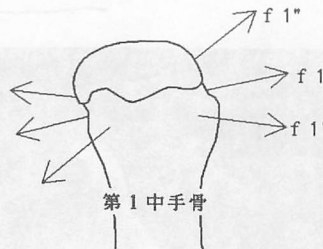


図3 MP関節の関節面

c) IP関節

最も重要さの少ない関節で、1軸1自由度をもち、軸 $f2$ のまわりのP2の屈曲となる。 $f2$ が少し斜めの軸であるため3~5度の回内運動を生じる。このために、屈曲はP2の縦回転を伴う。

4. 母指のモデル

母指を運動機構モデルと、変形解析のための有限要素法モデルの2つを考えた。

4.1 運動機構モデル

単純化のために、MP関節、IP関節をそれぞれ1自由度(軸 f_1 、 f_2)、TM関節を2自由度(軸 XX' 、 YY')、合計4自由度のモデルとした(図4)。軸 f_1 と f_2 は平行で、これらの軸と XX' 、 YY' とは垂直である。MP関節、IP関節では回内運動ではなく純粋な屈曲のみ生じる。また扱う運動は母指のみの対立運動であり、他の指や手掌は考慮しない。

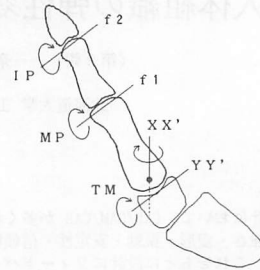


図4 運動機構モデル

4.2 有限要素法モデル

運動機構モデルをもとに、変形解析のためのFEMモデルを骨、皮膚・軟組織、腱・鞘の3層構造にした。要素タイプはアイソパラメトリック6面体20点要素を使用した。また、節点座標はCTデータから得た。

5. システム構成

システムの全体構成を図5に示す。まず、CTを用いて指の形状を測定し、有限要素法モデルをつくる。また運動機構モデルから骨の変位を求め、この骨の強制変位から有限要素法によって母指の組織の変形を求める。

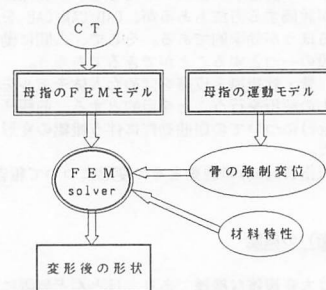


図5 全体構成

6. シミュレーション例

f_1 を5[deg]、 f_2 を5[deg]、 XX' を8[deg]、 YY' を8[deg]曲げたときのシミュレーション例を図6に示す。またこのときの材料定数を表1に示す。母指をまっすぐにしてCT撮影したため、変形前では指が少し反っている。

7. 終わりに

以上のことから結論として

- ①母指の機能を明らかにした。
- ②有限要素法モデルと運動機構モデルを構築した。
- ③母指モデルを用いシミュレーションを行った。

参考文献

- 1)平松 他：人体組織の弾性変形シミュレーションに関する研究(第1報)、1989年度精密工学会春期大会学術講演会論文集。
- 2)Raoul Tubiana, M.D.:The HAND Volume I, W.B.Saunders Company, 1981.

等方性材料

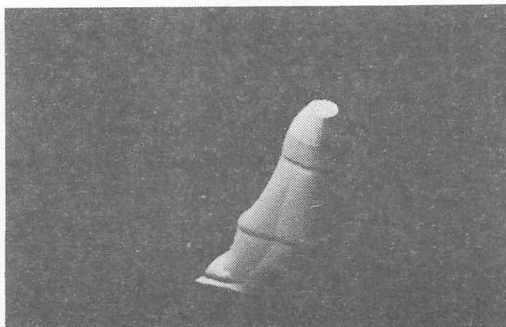
	ヤング率(Kg/mm ²)	ポアソン比
骨	0.8×10^3	0.3
関節部(表側)	1.0×10^1	0.03
関節部(裏側)	2.0×10^1	0.03
先頭部(爪)	0.8×10^3	0.3

異方性材料

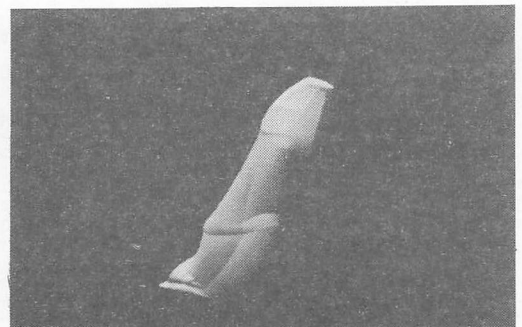
	ヤング率E1	ポアソン比	ヤング率E2	ポアソン比
軟組織(表側)	1.0×10^1	0.3	1.0×10^{-3}	0.3
軟組織(裏側)	2.0×10^1	0.3	2.0×10^{-3}	0.3

E1は指の方向のヤング率、E2は指に垂直な方向のヤング率。

表1 材料特性(ヤング率の単位はKg/mm²)



変形前



変形後

図6 シミュレーション例