

システム技術開発調査研究

15 - R - 2

デジタルハンド技術に関する調査研究

報告書

要旨

平成 16 年 3 月

財団法人 機械システム振興協会

委託先 社団法人 人間生活工学研究センター



この事業は競輪の補助金を受けて実施したものです。

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとに、機械システムの開発等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業等を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 放送大学 教授 中島尚正 氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を民間の調査機関等の協力を得て実施しております。

この「デジタルハンド技術に関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が社団法人 人間生活工学研究センターに委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成16年3月

財団法人機械システム振興協会

はじめに

現在、コンピュータ支援のない機械システム設計は考えられない。単に図面設計作業を支援する CAD だけでなく、設計段階で機械システムの構造、強度、機構、製造コストや生産性、さらには外観意匠に至るまでを事前評価する CAE の利用が進んでいる。これにより、実体のモックアップを試作して実証確認する工程が大幅に低減され、デジタルモックアップと呼ばれる仮想試作が主流となってきている。機械システム単体の設計効率化が進む一方で、機械システムを使う人間と機械システム系全体の整合性を調べ、人間に適合する、使いやすく誤操作しにくい機械システムをデザインする部分の効率化はほとんど進んでいない。実体モックアップを試作して、それを実際の人間（パネラ）に使わせてみて使い心地を尋ねるといった計測・評価型の工程が残っている。それどころか、手間のかかる人間計測・評価工程をスキップし、設計者のデザインセンスに任せるままになっていたり、とにかく製品を市場に出して操作性が悪いなどクレームが多ければバージョンアップ時に変更するなど、あまり科学的ではない場当たりの対応で製品ができあがっているのが実状である。人間が扱う機械システムは、機械システム単体が最先端のエンジニアリングを駆使して設計・製造されていたとしても、機械システムと人間との系全体としての整合性が満足できていないため、結局、十分に機能を果たせないシステムになっているのである。高機能・多機能でありながら、操作性が悪く使い勝手の悪い機械システムが身の回りにどれほどあるか、考えていただきたい。

これらの問題を解決するために、人間の機能やその多様性をコンピュータ上に再現し、デジタルモックアップと人間との適合性をコンピュータ上で仮想評価する技術が研究されてきている。特に、全身の寸法と体型の多様性を再現するコンピュータマネキン、自動車や航空機の設計に実際に活用され始めている。では、より身近な機械システムはどうであろうか。携帯電話、デジタルカメラ、マウス、キーボード、パッケージ...これらは、必ずしも全身的な体型と強い関係があるわけではない。むしろ、手と強い関係がある機械システムである。全身を再現したコンピュータマネキンにも当然手のパーツが付属しているが、それは粗大で無骨であり、デジタルカメラのスイッチストロークやパッケージ開封の力の配分を仮想評価するには無理がある。手の機能に特化し、より精密に機能と多様性を再現できるツールが必要であろう。これを「デジタルハンド」と呼ぶ。

デジタルハンドに関する研究は、まだ、ほとんど進められていない。それは、全身モデルに比べて困難性の高い箇所が存在するからにほかならない。第1に要求精度が高い。指先の位置精度に関しておそらく 1mm、場合によってはサブミリの精度が必要になろう。第2は運動の多様性である。エネルギー消費の大きい全身動作に比べると手の運動は慣れやクセにより大きな個人差が生まれやすい。第3は操作反力と変形・摩擦の問題。第4は触覚・力覚の解明とモデル化である。本調査研究においては、これらの基礎的知見、技術的課題について、現時点でなにが明らかになっていて、どのような機能がどの程度の精度で再現できているかを調べ、その技術開発動向を俯瞰する。一方で、デジタルハンドという新しいコンセプトについて、さまざまな機械システムを設計する側からの要望・ニーズを明らかにする。その上で、デジタルハンドという技術が、どの

ような種類の機械システム的设计に、どのようなかたちで寄与しうるかを、デジタルハンドの機能再現レベルと合わせてマッピングするとともに、機械システム応用以外のアプリケーションについても可能性を模索していく。これらを総合して、デジタルヒューマンという新しい CAE ツール自身の市場性、さらには、そのツールを活用することによって生じる機械システム市場全体への波及効果を予想する。そして、具体的にどの人体機能を再現し、どのアプリケーション焦点を絞って研究開発を始めるのがよいかという研究開発のロードマップを提案する。

平成16年3月

社団法人 人間生活工学研究センター

序

はじめに

【目次】

1 . 本調査研究の目的.....	1
2 . 調査研究の実施体制.....	2
2.1 実施体制.....	2
2.2 調査委員会.....	3
3 . 調査研究成果の要約.....	5
第1章 手の機能計測技術の研究動向.....	5
1.1 研究動向概要.....	5
1.2 手の構造・機能.....	5
1.3 手の機能計測方法.....	7
1.4 まとめ.....	9
第2章 手の機能データベースの現況.....	11
2.1 データベース概要.....	11
2.2 データベース.....	11
2.3 まとめ.....	15
第3章 義手・ロボットハンドの開発動向.....	17
3.1 研究開発動向概要.....	17
3.2 義手と装具について.....	17
3.3 ロボットハンドについて.....	18
3.4 まとめ.....	19
第4章 仮想現実感における触覚提示技術の動向.....	20
4.1 研究開発動向概要.....	20
4.2 手指の触覚.....	20
4.3 触覚センサ.....	25
4.4 まとめ.....	27
第5章 人体CG表現技術の研究開発動向.....	29
5.1 研究開発動向概要.....	29
5.2 モデリング.....	29
5.3 可視化ソフト.....	31
5.4 まとめ.....	32
第6章 デジタルハンド技術を利用する時の産業界のニーズ調査.....	33
6.1 アンケート調査の概要.....	33
6.2 デジタルハンドに対する要求仕様・課題等.....	42
6.3 デジタルハンドの市場性について.....	49

4 調査研究の今後の課題及び展開.....	55
おわりに.....	58

1 . 本調査研究の目的

本調査研究の目的は、手をインタフェースとする機械システムを、さまざまな利用者の手の特性に適合するように設計するための「デジタルハンド技術」について、その実現可能性や市場規模等を調査することにある。

機械システムの多くは、ユーザインタフェースとして、手で操作するインタフェースを備えている。スイッチ、ハンドル、ボタンで操作する機器（計装機器、VTR、カーナビ、券売機など）あるいは、手で握って使うような小型の精密機器（携帯電話、内視鏡など）である。これらの機器操作において、手の大きさが合わずに使いにくい、指が届かない、指を挟んでしまった、ボタン位置を体得しにくい、グリップ感が悪いなど、さまざまな問題が生じている。これらの問題は、現象としては多様であるが、本質的に、設計者が利用者のバリエーションを想定できないことに起因している。「そんな大きさの手まで考えていなかった」「そんな使い方をするとは思わなかった」というものである。現在、これらの問題は、実際に製品を市場に出した後、利用者からのクレームに対応する形でマイナーチェンジすることで、解決されている。本調査研究の「デジタルハンド技術」とは、コンピュータ上に創り出す多様な仮想ユーザの「手」が、コンピュータ上に記述された機械システムに対して操作をすることにより、設計段階で、機械システムの持つ潜在的な問題箇所を洗い出すための技術である。

コンピュータ上に、仮想的にユーザの体型等を再現することで、機械システムの設計・評価をおこなうソフトウェアとしては、コンピュータマネキンと呼ばれるものがある。Jack, RAMSIS, Safework などのコンピュータマネキンが市販され、自動車・航空機などの設計に活用されている。これらのコンピュータマネキンにも、手のパーツはあり、指が動くように設計されているが、そのサイズや形状、あるいは動作生成等、手指の機能再現については、必ずしも十分ではない。事実、上記コンピュータマネキンの利用分野は、全身的な寸法設計や運動生成を要求される分野に限定されており、携帯電話や内視鏡、カーナビゲーションなどには応用されていない。本提案で調査する「デジタルハンド技術」は、手の機能再現に特化することで、従来、見過ごされてきた機械システム設計分野の人間適合性向上に資するものである。

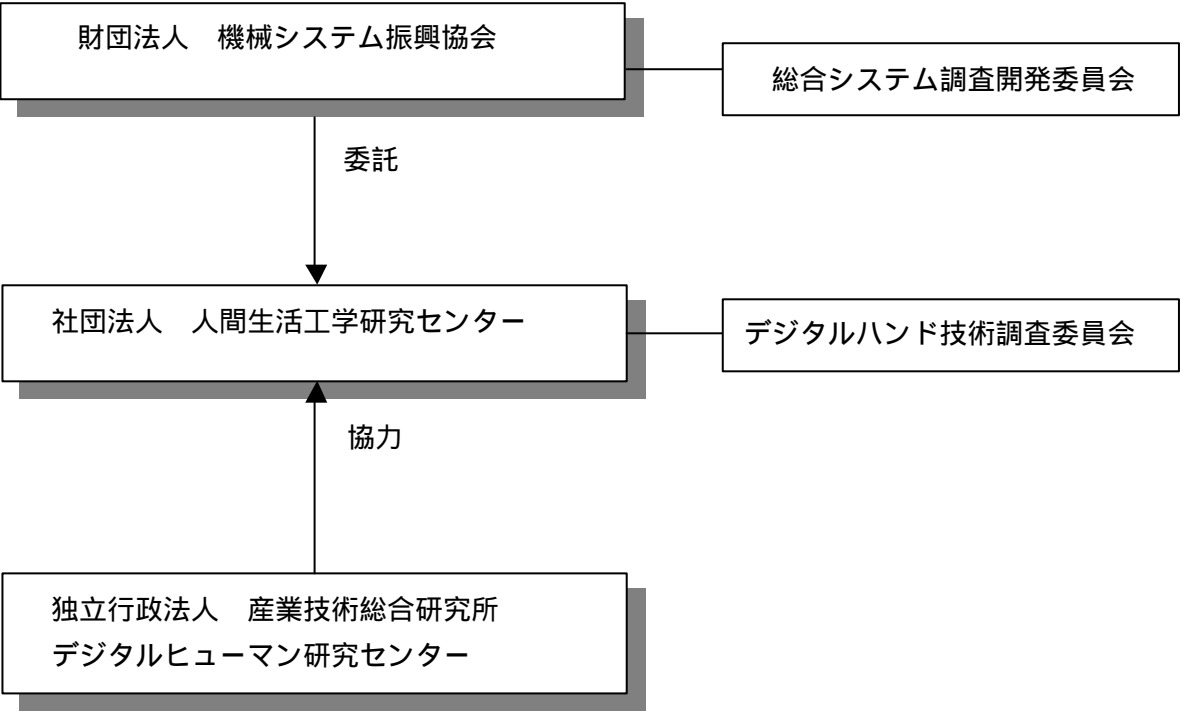
デジタルハンド技術を確立することにより、

- (1)製造者は、デジタルハンド技術を適用することで、設計段階において、コンピュータ上で、製品の操作性等の評価を行うことができ、利用者個人の手の大きさや機能に適合した付加価値の高い製品・機器の製造が可能となり、産業競争力が強化される。
- (2)高齢者をはじめする利用者が自分自身の手の大きさや機能に適合した使いやすい製品・機器を得ることができ、質の高い生活を送ることができる社会が形成されることに、大きく貢献することが期待されており、「デジタルハンド技術」の技術的課題等について把握することは必要不可欠である。

2 . 調査研究の実施体制

2.1 実施体制

(社)人間生活工学研究センターにおいて、主体的に調査研究を実施した。調査方針、調査内容については、独立行政法人 産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センターの指導を受けるとともに、「デジタルハンド技術調査委員会」を設置して、審議、確認を受け推進した。



2.2 調査委員会

2.2.1 総合システム調査開発委員会

総合システム調査開発委員会は以下の委員で構成した。

総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	放送大学 教授 東京多摩学習センター所長	中 島 尚 正
委 員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤 正 巖
委 員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学 大学院工学系研究科 助教授	藤 岡 健 彦
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 つくば中央第2事業所 管理監	太 田 公 廣
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 シニアリサーチャー	志 村 洋 文

2.2.2 デジタルハンド技術調査委員会

デジタルハンド技術調査委員会は以下の委員で構成した。

デジタルハンド技術調査委員会名簿

(順不同 敬称略)

委員長	独立行政法人産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター 副研究センター長	持丸 正明
委員	東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学専攻 助教授	太田 順
委員	トヨタ自動車株式会社 車両技術本部第1車両技術部人間工学 主査	金森 等
委員	国際医療福祉大学大学院 医療福祉学研究科保健医療学専攻 教授	鎌倉 矩子
委員	株式会社日立製作所 中央研究所ユビキタスメディアシステム研究部 主任研究員	栗原 恒弥
委員	東京大学大学院 情報学環・学際情報学府 教授	佐々木 正人
委員	電気通信大学 電気通信学部知能機械工学科 教授	下条 誠
委員	凸版印刷株式会社 パッケージ事業本部東京事業部企画販促本部 主任	高村 康正
委員	松下電器産業株式会社 パナソニックデザイン社パナソニックデザイングループ 主席意匠技師	田口 周平

3 . 調査研究成果の要約

第 1 章 手の機能計測技術の研究動向

1 . 1 研究動向概要

手の寸法・形状、運動、筋負担、指先にかかる圧力分布、触感覚等の手の機能に関する計測技術について、既往計測技術の状況を把握するために、インターネット検索、技術文献データベース(JOIS)検索を行った。また、産業レベルでの研究・実施例を把握するため、特許庁 IPDL(特許電子図書館)の特許検索(過去 5 年間)を行った。

人体寸法及び動作特性について、公的機関が計測マニュアルを発行している。また、国の予算で関節特性計測の研究が行われ、手の屈曲等の計測方法の提案が行われている。代表例を以下に示す。

寸法：生命工学工業技術研究所(現産業技術総合研究所)編「設計のための人体計測マニュアル」

動作特性：JIS「静的握り力計測方法」、「動的握り力計測方法」

(社)人間生活工学研究センター「製品開発のための動作計測マニュアル(1999年)」

手関節特性：製品評価技術基盤機構/HQL「人間の動作等に係る動的特性の計測評価(関節特性計測)(1998年)」

その他：触覚(スピアマン式触覚系)、指先圧力(摩擦特性)の計測装置

1 . 2 手の構造・機能

(1)手首の動き

手首は手のひら側にも、手の甲側にも、親指の側にも、そして小指の側にも自由に柔軟に曲げることができる。これらの動きは手首だけの動きの場合だけでなく、手首の先にある手の微妙な表情に加わってさりげなくその役割を果たしている。

解剖学で一般的にいわれている手首の曲がる標準的な角度は、手のひら側には約 85 度、手の甲の側にもほとんど同じ、約 85 度曲げることができる。手首は何か作業をするときには、手のひら側に曲がる方向に力を出すことが多いため、手のひら側のほうが大きく曲がるような気がするが、手の甲側にも同じくらい曲がる。また、何も力を入れていない状態では、手首はわずかに手の甲側に曲がっている。

手首は手のひらの面上でも動かすことができる。手のひら側と手の甲側の方向には、ほとんど同じ角度で曲げることができるが、手の親指側と小指の側に曲げることができる角度は明らかに異なり、親指側より小指側に大きく曲げることができる。おおよそ、その角度は親指側へは約 15 度、小指側には約 45 度である。

(2)手首のシワ

手首は手のひら側にも、手の甲側にも、親指側にも、そして小指側にも曲がって、それぞれ曲がった側の面にシワができる。しかし、伸ばしたままの手首にもシワができる。それも手の甲側にはほとんどなく、手のひら側にははっきりとした多くのシワができる。

手の甲の皮膚は、前腕の甲側と一続きのようになっている。一方、手のひら側は、手首のシワを境にまったく感触が異なり、中の構造にしっかりと止められているような感触である。手のひらはものをしっかり握ることができるように、皮膚がずれない構造になっている。

試しに手の甲と比較してみる。手の甲に反対側の指先を当ててグリグリと動かしてみると、皮膚と中身との結合がゆるく、皮膚はかなり自由に動く。ところが、同じことを手のひらでやってみると、皮膚はなかなか動かない。手のひら側では、前腕と手のひらのつくりの違いからその境目にシワがいつている。

(3)手首のくるぶし

手首の小指側に骨のふくらみがある。足首にはくるぶしというでっぱりが外側と内側の両方に存在する。しかし、手首には小指側しかなく、しかも名前がついていない。この正体は尺骨、つまり前腕の骨の一部である。このため、手首を動かしてもこの出っ張りは動かない。

(4)手の骨格

手首と指を結ぶ部分を構成する骨は、指と同じように5本に分かれている。骨格からみると指は手のひらから既に始まっている。したがって、手をぴんと伸ばすと指は閉じるが、閉じているのは指の骨だけではなく、手のひらの指も閉じている。

(5)手の動き

手は緊張してぴんと伸びた状態では、手のひらもほぼ平面状であるが、リラックスした状態では、手の指ばかりでなく手のひらの骨もアーチを描いて並んでいる。

(6)親指

手の骨を見てみると、手根骨、つまり手首の骨がある。これはマカデミアナツクくらいの大きさの骨が8個集まったものである。その先には手のひらの骨がある。手のひらの骨は5本で、それぞれに指に対応している。指の骨は3本でできているのは基本であるが、親指だけが例外であり、2本の骨でできている。ものをつかむときは通常、親指対残りの4本の指となるため、親指だけが例外である。

(7)腕と手の関係

上腕を作っている骨は上腕骨 1 本だけであり、上腕骨自体もほぼ円形であり、その周りに筋肉が着いて上腕になるため、結果として生体でも上腕は円筒形となる。上腕にある筋肉は大部分がひじ関節を動かす筋肉である。前腕が 2 本の骨でできているため、前腕と関係する肘関節の近くは、上腕骨のそれにあわせて左右に広がる形を示す。

前腕は 2 本の骨ででき、手のひらの広がりと同じ方向に 2 本が並んでいる。親指側が橈骨で、小指側が尺骨である。太さは同じ程度であり、平行になったりクロスしたりして互いの位置関係が変わる。2 本が並んでいるため、生体の前腕はやや扁平な円筒形になっている。2 本の骨の周りと間に筋肉があるためである。

上腕にある筋肉の大部分がひじ関節を動かす筋肉であるのと対照的に、前腕にある筋肉の大部分は、手首を動かすための筋肉ではなく、指を動かすための筋肉である。手首を動かすための筋肉もあるが、指を動かす筋肉のほうが優勢である。

前腕にある指を動かす筋肉は手首を腱というかたちですりぬける。手は「握る装置である」という一言に尽きる。手のひらの骨の動きも指の関節もみなこのためにかたちが決められている。ものを握るのは普通、親指対残り 4 本の指が向かい合って実現する。手のひらもその流れに沿っている。親指側で膨らんで握ることを補助しているのは母指球といわれる筋肉がたっぷり入った高まりである。残りの 4 本からの流れでできている小指側のふくらみが小指球である。

(8)手の関節

手のひらの骨と指の骨との間の関節を見してみる。手をぴんと伸ばし、親指以外の 4 本の指をそれぞれの付け根で前方に折り曲げてみると、骨が骨の周りを滑りおりるといった感じであることが分かる。

指の付け根にもシワがある。ところが、4 本そろった指はそこで曲がるのではなく、もっと下の手のひらのシワで曲がっている。指の付け根は、手のひらの骨と指の骨との関節よりも高い位置にあり、指の骨は手のひらの骨の前におりていくようになる。

手のひらの骨と指の骨との関節について、この関節がどの指でも曲げ伸ばしできるだけでなく、ヨコ方向にも動くことである。

指の骨は親指を除いて各指に 3 個あるため、関節はそれぞれ 2 箇所になる。図のとおり、シワの位置は関節の位置と一致している。つまり、指の骨と指の骨の関節は、シワのあるところでちゃんと曲がる。しかし、これらの関節は、手のひらの骨と指の骨との間の関節と異なり、指の曲げ伸ばしのみであり、ヨコ方向には全く曲がらない。

【引用】CG クリエーターのための人体解剖学 超現実を描けるのは現実を知る者だけ、桜木 晃彦、武田 美幸、2002 年 10 月 25 日、株ボーンデジタル

1.3 手の機能計測方法

1.3.1 手の寸法形状計測方法

生命工学工業技術研究所（現産業技術総合研究所）編「設計のための人体計測マニュアル（1994年2月）」が日本出版サービスから発売（人間生活工学研究センター発行）されている。



図3 - 1 - 1 手の計測点

1.3.2 手の関節特性計測方法

独立行政法人製品評価技術基盤機構（NITE）が、手関節機能の計測方法の開発を行い、ホームページで計測データとともに公開を行っている。

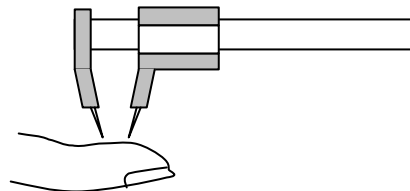
- ・最大発揮力（被験者が全力で発揮した力）
- ・関節自動可動域（被験者が自ら運動を行った時に得られる関節の可動範囲）
- ・関節受動抵抗（被験者が脱力した状態で、計測者によって他動的に関節を可動させた時に、それに抗するように働く力）

【引用】人間特性データベース（独立行政法人製品評価技術基盤機構）

<http://www.nite.go.jp>

1.3.3 触覚の計測方法

(1)スピアマン式触覚計



計測位置：利き手の第2指
（指先～第1関節の間地点）

図3 1 - 2 スピアマン触覚計

1.3.4 指先圧力（摩擦特性）の計測方法

(1) バイオトライボロジー

バイオトライボロジーとは、生体における摩擦・磨耗・潤滑を対象とする。生体における低摩擦の例として、鰻のヌメリが実感できる。また、人体の筋・骨格系の滑らかな運動を可能にしている生体関節は、一般の低速度の滑り軸受に比べると、非常に低い摩擦を維持している。関節の摩擦係数は、0.002～0.02 程度である。

一方、手指のような指紋（隆線）を有する皮膚では、垂直力の2倍以上の摩擦力が得られ、巧妙な筆さばきや複雑な手作業、物体の把持を容易にしている。手指とガラス間の摩擦実測（図3-1-3）により確認できたが、適度な湿分がある場合のほうが、完全に乾燥している場合（固体摩擦）よりも摩擦が高く、垂直荷重が低い程摩擦係数が増加する。これは、隆線頂部に存在する汗腺からの発汗が、表面力（液膜による表面張力や粘着力などに起因）として寄与するためである。ロボットの手により、柔軟物体を上手に保持するためには、軽荷重による高摩擦という生体指の摩擦制御機構を再現することも有効である。

- ・ 村上 輝夫、九州大学工学部知能機械工学科、九大
広報第4号

<http://www.kyushu-u.ac.jp/magazine/kyudai-koho/No.4/kenkyu-1.htm>

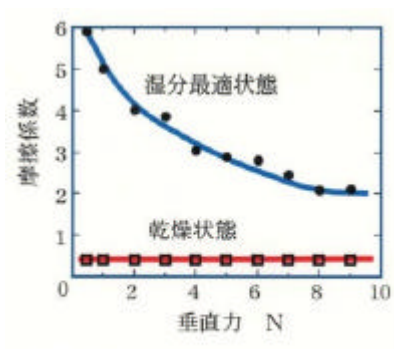


図3-1-3 手指とガラス間の摩擦特性

1.4 まとめ

手の寸法形態については、公的な研究機関（産業技術総合研究所）から、標準的な計測方法のマニュアルが発行されている。（社）人間生活工学研究センター（HQL）は、6歳～90歳代の男女約34,000人について、手の寸法39項目のデータベースを構築している。ただし、これらの寸法は基本的な姿勢に関するものであり、握る、つまむ、把持する等の日常的な姿勢（ポーズ）に関する寸法データは存在しない。

今後デジタルハンドの開発を行なう時には、基本姿勢だけでなく日常的に生じる代表的な姿勢（機能寸法）についても、手の寸法計測を行い、データベースを蓄積することが必要となる。

また、手の動きについては、関節特性を考慮する必要があるが、現在手首の関節特性に関する計測方法が提案されているだけであり、指の関節特性（関節可動域、関節受動抵抗、最大発揮力等）の計測方法についても、今後検討を行う必要がある。

指先や手掌の触覚、摩擦、力覚等の感覚特性については、計測方法自体が確立されていないため、今後、感覚特性をデジタルハンドに組み込むために、計測装置及び計測方法の確立が望まれるところである。

第2章 手の機能データベースの現状

2.1 データベース概要

手の寸法・形状、医用画像（MRI）、ダイナミクス特性、バイオメカニクス特性に関するデータベースについて、既往データベースの状況を把握するために、インターネット検索、技術文献データベース（JOIS）検索を行った。また、産業レベルでの研究・実施例を把握するため、特許庁 IPDL（特許電子図書館）の特許検索（過去5年間）を行った。

手の寸法形態、動作特性、関節特性等について、以下のデータベースがある。また、医用画像については MRI を中心に多くが提供されている。

寸法形態：

- ・産業技術総合研究所（DHRC）「日本人人体寸法データベース（1997～1998年）」
青年男女約 200 人、60 歳以上男女約 100 人、手については 4 計測項目
- ・（社）人間生活工学研究センター（HQL）「日本人の人体計測データ（1992～1993年）」
6～90 歳代の男女約 34,000 人、手については 39 計測項目

手関節特性：

- ・製品評価技術基盤機構（NITE）「人間特性データベース（ホームページ公開）」
20～80 歳代約 900 人、計測項目（最大発揮力、関節可動域、関節受動抵抗）
- ・NITE/HQL「人間の動作等に係る動的特性の計測評価（関節特性計測）（1998年）」
20～70 歳代の男女 70～240 人、計測項目（関節受動抵抗、最大関節トルク、関節可動域）

動作特性：

- ・HQL「高齢者対応基盤整備データベース（2000～2001年）」
指先でものに触る動作、握り太さ別の握りやすさ、手部の背屈・掌屈・尺屈

医用画像：

- ・PACS「医用画像保管管理システム」
- ・TAO「人体の三次元・四次元構造データベース」

医用画像については、撮影装置、画像表示装置、画像処理・診断装置等の特許が出願されている。

2.2 データベース

2.2.1 手の寸法形状データベース

(1)日本人人体寸法データベース（産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター）

- ・計測：1997年～1998年
- ・日本人青年男女約 200 名、60 歳以上の男女約 100 名

手の寸法の掲載項目

手幅	Hand breadth
手長 (手首の皺から)	Hand length from crease
手長 (橈骨茎突点 - 指先点)	Hand length from styliion
手厚	Hand thickness

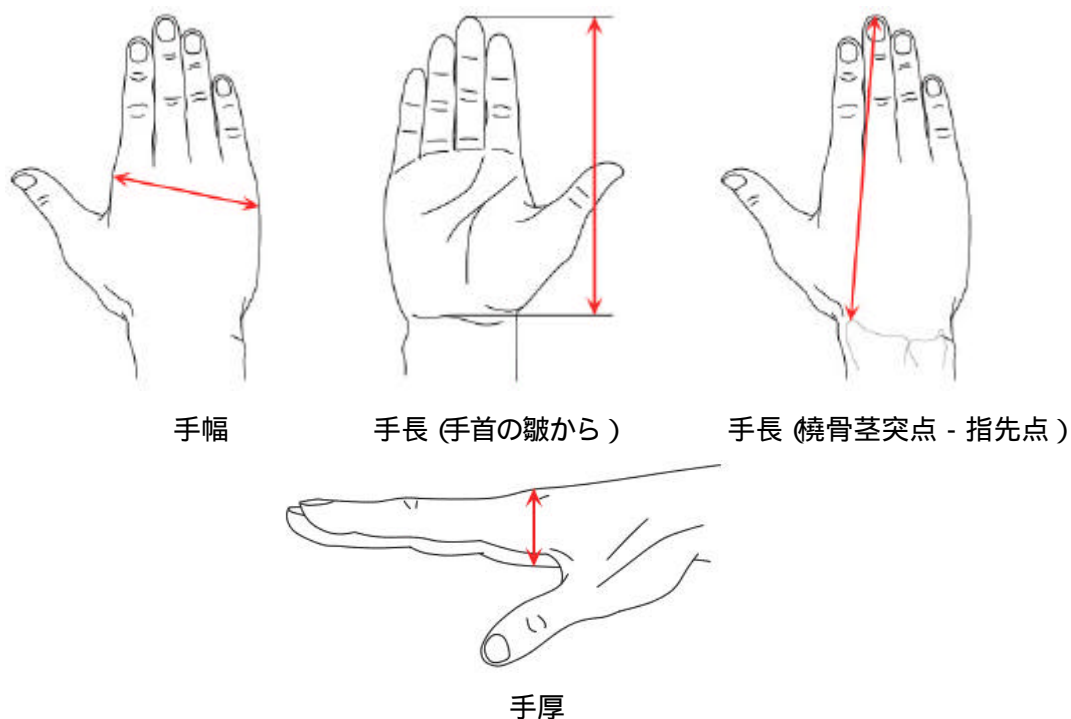


図 3 - 2 - 1 手の寸法項目図 (DHRC)

掲載データベース

表 3 - 2 - 1 高齢女性群統計量

項目	N	平均値	標準偏差	最小値	最大値	5%ile 値	50%ile	95%ile
手幅	50	78.9	3.5	70.0	86.0	72.9	78.5	84.0
手長 (手首の皺から)	50	168.3	7.1	149.0	184.0	157.4	168.0	178.6
手長 (橈骨茎突点 - 指先点)	50	179.4	7.9	161.0	198.0	166.3	179.5	193.7
手厚	50	28.5	1.6	25.0	33.0	26.0	28.0	31.0
第 1 指側角度	50	9.4	6.0	? -1.5?	31.8	1.0	9.0	18.1
第 5 指側角度	50	13.1	4.9	? -3.0?	23.5	5.6	13.5	20.4

表 3 - 2 - 2 高齢男性群統計量

項目	N	平均値	標準偏差	最小値	最大値	5%ile 値	50%ile	95%ile
手幅	51	86.2	4.5	76.0	95.0	78.5	87.0	93.0
手長 (手首の皺から)	51	177.6	8.4	161.0	194.0	165.0	177.0	191.0
手長 (橈骨茎突点 - 指先点)	49	188.7	8.6	171.0	207.0	176.2	189.0	203.6
手厚	51	31.8	1.8	28.0	36.0	29.0	32.0	34.5
第 1 指側角度	51	9.9	6.2	-1.0	30.0	1.3	8.5	18.8
第 5 指側角度	51	14.0	3.6	7.5	22.0	8.7	13.5	20.0

表 3 - 2 - 3 青年女性群統計量

項目	N	平均値	標準偏差	最小値	最大値	5%ile 値	50%ile	95%ile
手幅	106	73.6	3.2	66.0	85.0	69.0	74.0	79.8
手長 (手首の皺から)	107	167.8	7.9	146.0	188.0	155.0	168.0	178.7
手長 (橈骨茎突点 - 指先点)	107	177.1	8.6	154.0	202.0	165.3	177.0	189.0
手厚	106	25.7	1.4	23.0	29.0	23.3	26.0	28.0
第 1 指側角度	105	10.7	4.6	0.0	26.0	3.2	11.0	17.8
第 5 指側角度	105	8.4	5.4	-6.0	21.5	-2.4	9.5	14.0

表 3 - 2 - 4 青年男性群統計量

項目	N	平均値	標準偏差	最小値	最大値	5%ile 値	50%ile	95%ile
手幅	110	81.8	3.3	74.0	89.0	76.0	82.0	86.6
手長 (手首の皺から)	110	180.6	7.2	162.0	198.0	169.5	180.0	190.6
手長 (橈骨茎突点 - 指先点)	110	189.1	7.7	169.0	212.0	177.9	189.0	202.6
手厚	110	28.9	1.9	25.0	36.0	26.5	29.0	32.0
第 1 指側角度	110	8.7	3.5	-2.0	18.5	2.7	9.0	14.0
第 5 指側角度	110	11.4	4.8	1.0	23.5	2.2	11.5	19.5

【引用】産業技術総合研究所・製品評価技術基盤機構、「人体寸法データベース 1997-98 (CD-ROM)」, 2001.4.9

(2)日本人の人体計測データ((社)人間生活工学研究センター(HQL))

- ・計測： 1992年～1993年
- ・6歳～90歳代の男女約34,000人(全国)

- ・掲載されている手の寸法項目（39 項目）

手長(しゅちょう)、手掌長(しゅしょうちょう)、第1・第5 指尖(しせん)最大距離、指尖(しせん)・指節点、距離、手幅(しゅふく)、最大手幅(しゅふく)、第3 指基節(きせつ)長、にぎり最大径、にぎり内径、手首の厚さ、母指球での手の厚さ、手厚、手首囲、手囲(しゅい)1、手囲(しゅい)2、にぎりこぶし囲、第1 指長(しちょう)、第2 指長(しちょう)、第3 指長(しちょう)、第4 指長(しちょう)、第5 指長(しちょう)、第1 指関節幅、第2 指近位関節幅、第3 指近位関節幅、第4 指近位関節幅、第5 指近位関節幅、第2 指遠位関節幅、第3 指遠位関節幅、第4 指遠位関節幅、第5 指遠位関節幅、第1 指関節厚、第2 指近位関節厚、第3 指近位関節厚、第4 指近位関節厚、第5 指近位関節厚、第2 指遠位関節厚、第3 指遠位関節厚、第4 指遠位関節厚、第5 指遠位関節厚

【引用】発行(社)人間生活工学研究センター、「日本人の人体計測データ 1992-1994」, 1997.10

(3)高齢者対応基盤整備データベース((社)人間生活工学研究センター)

経済産業省委託事業「高齢者対応基盤整備研究開発」データベース整備(動態・視聴覚特性)

- ・計測：2000 年～2001 年
- ・20 歳代～80 歳代の男女約 200 名(高齢者が主)
- ・データベース
 - 握り内径
 - 手長
 - 手幅
 - 手を閉じたときの第2～第4 指間寸法
 - 手を普通に置いたときの第2～第4 指間寸法
 - 手を広げたときの第2～第4 指間寸法
 - 手部の背屈
 - 手部の掌屈
 - 手部の撓屈
 - 手部の尺屈
 - 握力

【引用】平成13年度経済産業省委託事業「高齢者対応基盤整備研究開発」第 編データベース整備(動態・視聴覚特性)報告書

2.2.3 手の関節特性データベース

(1)人間特性データベース(手関節特性)(独立行政法人製品評価技術基盤機構)

- ・計測：日本人男女約 900 名 20～80 歳代
- ・計測項目(手関節)

最大発揮力：被験者が全力で発揮した力

関節自動可動域：被験者が自ら運動を行った時に得られる関節の可動範囲

関節受動抵抗：被験者が脱力した状態で、計測者によって他動的に関節を可動させた時に、それに抗するように働く力

【引用】人間特性データベース(独立行政法人製品評価技術基盤機構)

<http://www.nite.go.jp>

(2)関節特性計測((社)人間生活工学研究センター)

- ・計測：1999 年
- ・日本人：男女 20～70 歳
- ・データベース
 - 最大関節トルク(屈曲)
 - 最大関節トルク(伸展)
 - 関節自動可動域(屈曲)
 - 関節自動可動域(伸展)

【引用】平成10年度即効的知的基盤整備委託調査研究「人間の動作等に係る動的特性の計測評価」(関節特性計測)調査報告書、平成12年3月、(社)人間生活工学研究センター

2.3 まとめ

手の寸法形態に関しては、産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター(DHRC)は、青年男女200人、60歳代100人規模の、また(社)人間生活工学研究センター(HQL)からは、6歳～90歳代の男女約34,000人について、手の寸法39項目のデータベースが構築されている。ただし、これらの寸法は基本的な姿勢に関するものであり、握る、つまむ、把持する等の日常的な姿勢(機能寸法)に関する寸法データは存在しない。今後デジタルハンドの開発を行なう時には、基本姿勢だけでなく日常的に生じる代表的な姿勢についても、手の寸法計測を行い、データベースを蓄積することが必要となる。

また、手の動きについては、関節特性を考慮する必要があるが、現在手首の関節特性に関するデータベースが製品評価技術基盤機構(NITE)から公開されているが、指の関節特性(関節可

動域、関節受動抵抗、最大発揮力等)のデータベースは存在しない。手は手単独の動きとなることは稀であり、腕や肘と一体的な動作をすることが通常であることから、製品の把持・操作に応じた腕や肘の動きとの関連性についても考慮する必要がある。

指先や手掌の触覚、摩擦、力覚等の感覚特性については、計測方法自体が確立されていないため、今後、計測技術の開発と合わせて、感覚特性をデジタルハンドに組み込むためのデータベースの整備が望まれるところである。

第3章 義手・ロボットハンドの開発動向

3.1 研究開発動向概要

モノの把持や手の動きに関する機械的なアプローチとして、義手及びロボットハンドに関する既往技術の状況を把握するために、インターネット検索、技術文献データベース（JOIS）検索を行った。また、産業レベルでの研究・実施例を把握するため、特許庁 IPDL（特許電子図書館）の特許検索（過去5年間）を行った。

義手

- ・電動義手、筋電義手の駆動方式のものがある。
- ・義手制御として、筋電パターン、多軸義手同時制御、皮膚表面筋電、筋の形状変化、マイコンを利用するものがある。
- ・視覚・触覚・握力等の感覚をフィードバックするものの研究が行われている。
- ・筋電義手の製造方法、構造、制御装置、動力伝達機構、筋電信号生成装置に関する特許が出願されている。

ロボットハンド

- ・機能によって、把持・操り等を行なう多指ハンドと加工用に使用される多機能ハンドがある。
- ・人間の手に近い器用な動作を行う、多関節多指ハンド、人間型ロボットハンドが開発されている。
- ・視覚、指先力覚、触覚等をフィードバックするロボット用センサの研究が行われている。
- ・ロボットハンドに関する製造方法、関節・把持構造、運動、指の動き伝達装置、力感センサ装置等の特許が出願されている。

義手及びロボットハンドのセンサ技術について、デジタルハンドの力覚、触覚フィードバック等に参考となる情報が得られた。

3.2 義手と装具について

義手に関しては、ロボット工学の一部としての研究に近い位置にあることから、様々な進んだ機能を持った義手が使われているように想像されている場合があるが、実用に供されている義手は、極めて単純な動作を実現しているにすぎない。マイコン制御の肩義手、ニューラルネットやバイオメティックス・コントロールの手法を応用したマルチファンクションの可能性を示唆する研究が行われているが、ここ20年で日本で行われた筋電義手と電動義手は国内製品と輸入製品を含めて、わずか319本であるという報告もあり、研究室と臨床現場のギャップは義足よりも大きいかもしれない。

装具については、前述のように、必要とする人口は義肢に比較して圧倒的に多いにもかかわらず

ず、研究は進んでいない。最近までは、新しいプラスチック材料などを応用することにより、従来は困難であった機能を実現したり、同等の機能を有する装具を軽量化して開発する傾向があったが、油圧ダンパなどの機能的要素を加える試みが開始されたところで、制御能力を失った生体を外部装置によって制御するという概念を導入するには至っていない。装具と FES (機能的電気刺激) との組み合わせによって、一定の機能を回復する試みは盛んになりつつある⁶⁾。

【引用】生体機械工学、(社)日本機械学会、1997年4月15日(初版第1刷)2001年10月1日(初版第3刷)

3.3 ロボットハンドについて

(1) ロボットの制御方法による分類

ロボットの制御方法は、4つの世代に分けられる。

第1世代の「操縦ロボット」、「シーケンス・ロボット」、「プレイバック・ロボット」、「数値制御ロボット」は1960年代にスポット溶接等の単純動作の繰り返しの用途に使用された。

第2世代(1970年代)の「感覚制御ロボット」と「適応制御ロボット」は、人間の五感に相当するセンサを備え、そこからの情報に応じた動作が可能になった。

第3世代(1980年代)になると、「学習制御ロボット」が登場した。装備されるセンサがより高度にあり、知覚と認識の性能が大幅に向上し、作業経験などを元にして、組み立てロボット等の作業を行うことができるようになった。

2000年代は人工知能を搭載した「知能ロボット」の時代になり、人間に近い動作が期待できるようになった。

(2) 多指ハンド

多指ハンドを備えると、ロボットアームは形や材質にとらわれることなく、多くの対象物を扱えるようになる。多指ハンドの指先にセンサを取り付けることにより、対象物を把持する際に対象物の材質を探り、どの程度の摩擦が生じるかを調べることができる。制御によっては、意図的に滑りを伴う把持動作を実行し、対象物をつかみ直すことも可能になる。

しかし、実際にはその制御の難しさが実用化への障害となっている。指先に搭載するセンサは、さらなる小型化と高性能化が必要である。

(3) 多機能ハンド

多機能ハンドの目的は対象物を把持するのではなく、対象物を加工することが主目的である。そのためのツールを手先につけたものが「特殊ハンド」であり、多機能ハンドはそれを複数使い分けられるものである。

(4) ロボット用センサ

触覚センサ

突起物や柔軟性のある導電性皮膜によるスイッチ機構が一般的な触覚センサとして使用されることが多い。これ以外に、光の性質を利用した「指先搭載型触覚センサ」がある。

圧覚センサ

物体の硬さを知りたい時に使用し、ひずみゲージを利用するものが一般的である。

【引用】 城井田勝仁著、「入門ビジュアルテクノロジー ロボットのしくみ」、日本実業出版

3.4 まとめ

400年前の義手から、当時の設計条件として、ヒトの手の外観に近い、指が屈伸する、工具や日常の道具を使えるような機能を有する等が想像できる。その後、歯車による手首や指の駆動、様々な制御方式やマイコンの適用を得た今日においても、この条件は障害者の希望ともおおむね一致している。

現在の電動義手はインテリジェント化（インテリジェントハンド）が進み、マイコンの機能を利用して、対象物にあった把持力をもたすことができるようになっている。母指部にはタッチセンサ（感圧ゴムの抵抗変化を利用）が内蔵され、把持物体をパターン認識し、体の動きで文字を書いたり、ビール瓶を保持することが可能となっている（東京電機大学 齋藤之男研究室）。

最近の電動ハンドはヒトの外観に酷似した装飾性を備えるようになったが、義手の開発の歴史はメカニズムより制御性の向上であり、最新の技術がその性能を押し上げている。

一方、ものの把持や操りを行うロボットハンド（多指ハンド）は、指先にセンサを取り付けることにより、対象物の材質や摩擦を探ることができる。ロボット用センサとして、触覚センサ、圧覚センサ等があり、意図的に滑りを伴う把持動作を実行し、対象物をつかみ直すような制御が可能であるが、実際にはその制御の難しさが実用化への障害となっている。指先に搭載するセンサのさらなる小型化と高性能化が必要である。

本章の義手及びロボットハンドのセンサ技術に関する調査結果から、デジタルハンドの力覚、触覚フィードバック等に参考となる情報が得られた。指の機能の向上については、指先の感覚が精緻であることと動きが複雑なため、まだまだ課題が大きい。

第4章 仮想現実感における触覚提示技術の動向

4.1 研究開発動向概要

「さわった」「押された」「痛い」等の触覚を仮想的にコンピュータ上にモデル化する触覚提示技術について、既往技術の状況を把握するために、インターネット検索、技術文献データベース(JOIS)検索を行った。また、産業レベルでの研究・実施例を把握するため、特許庁 IPDL(特許電子図書館)の特許検索(過去5年間)を行った。バーチャルリアリティに関する文献が多く検索された。

バーチャル空間での把持・操作の動作呈示、触覚呈示、力覚呈示のモデリングの研究が大学を中心に進んでいる。

- ・センサグローブ、サイバークロブ等の触覚センサを用いた、人の手のモノの把握メカニズムの研究
- ・データグローブの内蔵センサによる三次元位置と関節の曲げ角度の測定

人間の触覚は深部感覚と皮膚感覚に大別され、様々なアクチュエータを用いた皮膚感覚ディスプレイが提案されている。弾性体モデルによる静的変形だけでなく、なぞり等の動的変形も触覚に影響を与える。

特に触覚モデルに関しては、「弾性波動を用いた皮膚感覚ディスプレイ(東京大学)」、「皮膚弾性モデルによる痛覚受容の計算機シミュレーション(慶応大学)」が注目される。

手指の摩擦特性(バイオトライポロジー)に関しては、変形・摩擦モデル、指腹部の固着・滑り分布等の研究が行われている。

触覚については、触覚センサの検知量補正方法、肌表面状態評価方法、質感提示方法等の特許が出願されている。

バーチャル空間での既往の触覚等の提示技術はデジタルハンドに触覚・力覚を取り込むときの有用な技術となり得ると考えられる。

4.2 手指の触覚

4.2.1 手指の触覚について

器用な手に大きく関わる指腹部などの無毛皮膚について述べる。ヒトの場合は、指先に皮膚パッドという凹凸(指紋)のあるふくらみが存在する。

(1)指腹部における皮膚の構造

ヒト指腹部の軟組織は、表皮、真皮、皮下脂肪組織からなる。表皮と外界との境界には指紋がある。また、表皮と真皮の境界には真皮乳頭と呼ばれる突起群がある。真皮乳頭は指紋の直下に整然と2列に配置されており、ヒトの場合は真皮乳頭の先端がさらに枝分かれしていることが多い。表皮は角質層、透明層、顆粒層、有棘層、基底層からなり、角質層が表皮の1/2~1/3の厚

さを占める。著者らの計測¹⁾によれば、変位が十分小さい範囲では、表皮、真皮、皮下組織の縦弾性係数は、それぞれ、約 $1.4 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $8.0 \times 10^4 \text{Pa}$ 、 $3.4 \times 10^4 \text{Pa}$ であり、表面に近いほど大きく、硬い層になっている。指表面と物体との間の摩擦係数は、対象物によって変化するが、一般に 0.5 ~ 2.5 程度である²⁾。なお、指指紋線凸部の汗腺から分泌される汗により、物体との摩擦係数は大きく変化する。

(2) 触覚受容器の配置と特性

皮下には多数の触覚受容器が存在している。無毛皮膚部には、形・大きさ・配置の異なる複数種の触覚受容器が埋め込まれており、それぞれの触覚受容器の配置は皮膚構造と深く関わっている。マイスナー小体は真皮乳頭内に存在する楕円球状の受容器であり、受容器の内芯が表皮下部の基底層と結合している。メルケル小体は狭義のメルケル細胞と軸索終末（メルケル盤）の複合体であり、真皮乳頭間の真皮基底層の最深部に数個ずつかたまっている。

(3) 皮膚の構造と触覚受容の関係

皮膚の力学的構造と触覚受容との関係について述べる。Srinivasan³⁾らは、凹凸波長の変化するくし歯状の刺激棒と指断面が接触する際に、触覚受容器が発する神経インパルスの発射頻度と、有限要素法で求めた触覚受容器近傍のひずみエネルギー密度（SED）の分布を比較した結果、両者は非常に良く似た傾向を示した。つまり、それぞれの触覚受容器は、SED がそれぞれの受容器の閾値に達するとインパルスを発射している。

また、筆者ら^{1) 4) 5)}は、指腹部の指紋、表皮、真皮、皮下脂肪組織の形状を詳細のモデル化して、対象物との静的・動的な接触時における各触覚受容器のインパルス発射頻度を有限要素解析し、それぞれの触覚受容器の配置の妥当性を確認した。つまり、真皮と表皮の境界付近に配置されている SAI（メルケル小体）と FAI（マイスナー小体）は、ちょうど応力集中が生じる場所に配置されているため、皮膚構造の影響を受けやすい。特に、SAI は真皮乳頭を考慮した場合に SED が大きくなり、触覚受容感度が増大する。これは、真皮乳頭の構造により応力集中が生じたためである。一方、FAI は指紋の構造を考慮した場合に SED が大きくなり、触覚感度が増大する。これは、それぞれの指紋の凸部で接触反力の極大値が生じ、近傍で応力集中が生じるためである。特に、指紋表面に接線方向の摩擦力が加わった場合に h が、指紋直下に 2 列に並んだマイスナー小体のうちの一方の SED が大きく、他方の SED が小さくなる。

一方、ヘルツの接触理論⁶⁾として知られているように、曲面状弾性体が平板と接触する際には、弾性体内部にせん断ひずみエネルギーが極大となる個所がある。FAII（パチニ小体）、SAII（ルフィニ小体）はちょうどせん断ひずみエネルギーが極大となる個所付近に配置されている。

以上のように、それぞれの触覚受容器は、指紋、真皮乳頭などの複雑な皮膚構造と深くかかわりあうことによって、触覚情報を検出している。

[参考文献]

- 1) 前野、小林、山崎、“ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係”、日本機械学会論文集、C 編、Vol.63、No.607、pp881-888、1997
- 2) 嶋田、韓、川村、“人間の手指の摩擦特性の解析”、計測自動制御学会論文集、Vol.32、No.12、

pp1581-1587、1995

- 3) M.A. Srinivasan and K. Dandekar, "An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip," Trans, ASME, J. Biomech. Eng., 118, p48-55, 1996
- 4) 小林、前野、" ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第2報 動的接触解析手法および移動する平面と指の動的接触解析結果)、日本機械学会論文集, C 編、Vol.64、No.628, pp4798-4805、1998
- 5) 小林、前野、" ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第3報 凹凸を有する面と指の接触解析結果)、日本機械学会論文集, C 編、Vol.65、No.636, pp3321-3327、1999
- 6) K.L. Johnson, "Contact Mechanics," Cambridge Univ. Press, 1985

【引用】前野隆司 (慶応義塾大学) 「ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能」、日本ロボット学会誌、Vol.18、No.6、pp772-775、2000.9

我々の手に指先で指紋のある皮膚領域では、その場所をわずか 1μ だけ垂直にへこますような圧迫でも感じとることができる。この場合、マイスナー感覚小体と呼ばれる特別な終末装置を形成している第1次ニューロンがわずかな圧迫を、もののみごとに捕らえて脳へ信号を送っている。

他の指先や指腹、手掌に数多いパッチー二層板小体 (触覚ではなく、圧覚や振動覚の検出器とされるもの) は皮下組織の脂肪のなかに埋め込まれている。パッチー二層板小体はさらに胃や腸等、腹部内臓における外表面近くの脂肪層や大網 (エプロンのように胃腸の前面に接触するかたちで大きく垂れ下がる薄膜) の脂肪層にも分布している。パッチー二層板小体の芯に相当する場所を占めているものも、第1次ニューロンの末梢部分である。胃が膨れたとき、胃腸の動きが食事とともに急に活発になった時などには、消化管壁の層板小体も、また消化管に直接触れている大網区域での層板小体も、ともに圧迫刺激を受けることになり、最終的には信号が脳に達することで満腹感のひとつの大きな成因がもたらされる (咀嚼運動をしばらくつづけること、食後に血中グルコース濃度が上昇していることが満腹感をもたらす別の成因)。

皮膚の一部が特別な変形をとげることによって、形成されるものに爪と毛がある。毛の根元には毛の傾きを検出する第1次ニューロンが巻きついている。毛を少しだけ傾けさせる弱い圧迫感が触角をもたらせるのにちょうど適した刺激であるといえるが、その場合の触覚は、毛の傾きが変化した直後にだけ生じ、長続きしないという特徴を示す。

これに対して、持続性に触覚をもたらす装置が表皮内のメルケル細胞への接着を示す第1次ニューロン終末、それに真皮内のメルフィーニ等である。

【引用】感覚の地図帳、山内昭雄・鮎川武二著、講談社、2001年11月20日

4.2.2 触覚の特性

(1)空間分解能

感覚受容器の数は 10^7 個であり、全身体では、痛覚（自由神経終末）が 2×10^6 個、温点が 3×10^4 個、冷点が 2.5×10^5 個あるとされている。また、大脳皮質への神経伝達線維本数は 10^6 本で感覚受容器と信号線数の比は 10 となっている。感覚受容器の密度が高いとされる指先の例では大脳皮質の感覚野に伝達する神経線維は 1mm^2 当たり 1 本といわれている。このため、指先での 2 点分解能が 2mm、手掌では 10 mm 程度とされている。

(2)時間応答特性

振動刺激に対する人間の閾値の周波数特性が調べられている。この閾値は刺激子の面積、身体部位、刺激 ON 時間、皮膚温など多くのパラメータの影響を受ける。Bolanowskiらは、感覚受容器の特性が皮膚温によって異なること等を用いて、4種の機械受容器の振動閾値の周波数特性を計測した¹⁾。この結果は、メルケル細胞（SA）は非常に低い周波数（数 10Hz）において最も感度が高く、100Hz 程度まで広がっている。皮膚が緩やかに動いているように感じられる低い正弦周波数では、SA タイプの受容器が決定的な情報を担っていると考えられる。マイスナー小体（FA）は数 Hz～数 100Hz 程度まで広がっている。5 Hz から 40Hz の周波数のパタパタした感じ（flutter）の検出は FA が担っているように思われる。パチニ小体（FA）は 250Hz 当りに最小値をもつ U 字型の特性を示し、最小閾値は $0.2 \mu\text{m}$ 以下となる。日常生活において微小刺激の存在を感じるのは、FA によるものであろう。

(3)表面状態識別

Johanssonら²⁾は、人間の指先検知能力をドットパターンの直径が $50 \mu\text{m}$ では、 $6 \mu\text{m}$ 、 $500 \mu\text{m}$ では $1 \mu\text{m}$ の凸を検出可能としている。

滑り検出については、Srinivasanら³⁾、平面のみおよび $1 \mu\text{m}$ ドットパターン付き平面などの試験片を用いて実験を行った。その結果、被験者は滑りの有無に関わらず、これら試験片の引っ張り方向を検知できるが、ドットパターンがないと滑り状態は検知できないことを示した。

(4)温度特性

ヒトの場合、温度感覚は、皮膚上の冷点と温点とによって検出される。その受容器はいまだ完全には解明されていないが、神経線維の自由神経終末といわれている。この2種の受容器が示す発火頻度曲線は温度に対して鐘状をなし、冷覚では 29、温覚では 43 あたりで最大値を示す。冷点と温点の密度を比較すると冷点のほうが明らかに多く、手の表面には 1cm^2 当たり 1～5 個の冷点が存在するが温点は 0.4 個程度である。ぬるま湯に浸かると始めは温感を生じるが時間が経過すると順応して、この感覚はなくなる。順応の起こる温度範囲を無感帯という。無感帯の温度範囲は面積によって変化するが、30～36 である。この範囲外では持続性の冷感、温感が生じる。この他、温度変化検知に対する特性として、皮膚温が変化したときに温/冷感覚を生じさせる温度変化について初期皮膚温との関係について明らかにされている。たとえば、皮膚温が 32 の場合、+0.4 変化すると温感が生じ、-0.2 変化すると冷感が生じる。

(参考文献)

- 1) S.J. Bolanowski, G.A. Gesheider, R.T. Verrillo and C.M. Checkosky: Four channels mediate the mechanical aspects of touch, J. Acoust. Am, 85-5, 1680/1594 (1988)

2) R.S. Johansson and R.H. LaMontte: Tactile detection thresholds for a single asperity on an otherwise smooth surface, Somatosens, Res., 1, 21/31, (1983)

3) R.H. Lamotte and M.A. Srinivassan: Surface Microgeometry; Tactile Perception and Neural Encoding: Information processing in the somatosensory system, wengergren Int. symp. Series, 7, Stokton press, 49/58 (1989)

【引用】下条誠（電気通信大学電気通信学部）「人間感覚の計測と情報処理 - 皮膚感覚の情報処理」、計測と制御、第 41 巻第 10 号（2002.10）

4.2.3 触覚受容機構解析

ヒトは物体の表面をなぞる触運動によって物体表面の状態や質感を検知したり、物体を滑ることなく巧みに把持することができる。このような優れた特性を持つヒトの触覚受容機構を解明することは、生体を模倣した触覚センサや仮想的な触覚生成機構の開発のために重要である。

本研究では、ヒト指腹部の皮膚表面（指紋）および皮下組織が複雑な形状を有することに着目し、皮膚構造を有限要素法を用いて詳細にモデル化を行った。このモデルを用いて、指が物体に接触した場合の触覚受容器近傍の応力・ひずみ状態を解析し、皮膚の構造と触覚受容器の位置の力学的関係を明らかにしている。

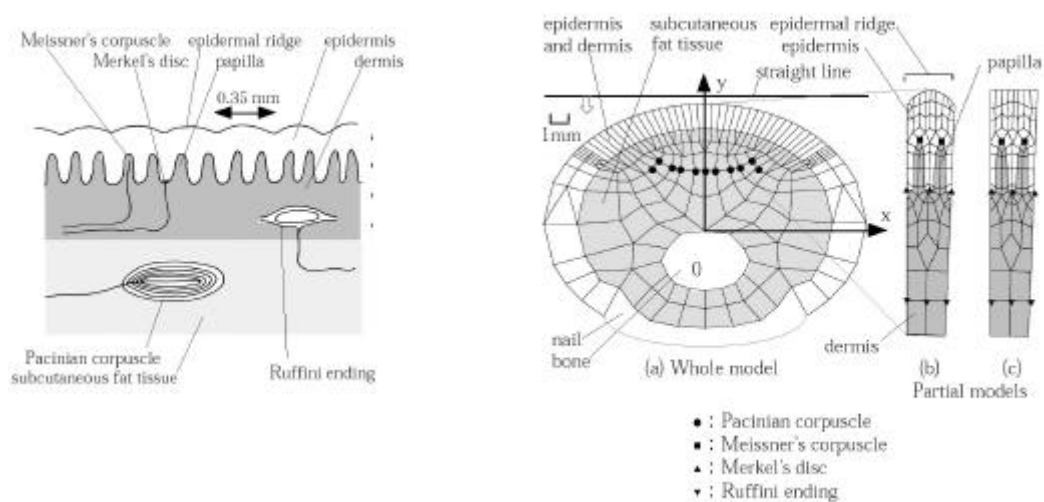


図 3 - 4 - 1 指断面の有限要素モデル

【引用】前野隆司、小林一三、山崎信寿（慶応義塾大学理工学部）「ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係」、日本機械学会論文集（C 編）63 巻 607 号（1997-3）論文 No.96-0893

4.3 触覚センサ

4.3.1 触覚センサの現状

皮膚感覚センサを開発する上で重要なことは、このような薄型・柔軟性といった形状・材質的制約条件の下で検出素子を如何に配置するかという問題と、高密度に配置した場合に多数の検出器からの配線の処理と多量のデータ処理の問題がある。このような触覚を工学的に作ろうとする試みは、主にロボット用触覚センサの開発としてこれまで以下のような多くの研究が行なわれている。

触覚センサ

・シート状触覚センサ

ロボットの全身を覆うための触覚センサスーツがある。センサは網目状のスペーサを導電性シートで挟み、導電性繊維で配線を構成したもの。加圧力によって導電性シートがたわみ、スペーサを介して導通することから接触を検知する構造となっている。薄く柔軟性があるため手袋状に成形して人間の把持力分布計測に用いられている。

・柔軟な表面をもつ触覚センサ

皮膚の機械的特性及びセンサの空間配置が人間の触覚機能に大きな影響を及ぼすと言われている。ヒトの指の構造と触覚受容器の位置関係をできるだけ忠実に有限要素法モデルに置き換え、解析を行ってみると、触覚受容器は応力集中部分に存在すること、指紋等の特性に大きな影響を与えること等の報告がある。また、触覚センサを構成する弾性体の計測に与える影響として、センサ表面上の圧力分布が弾性体内部では分布の広がりを生じ、弾性体内部に配置された検出器では正確に接触力分布を計測していないことがあげられる。最近このような弾性体構造を積極的に利用して接触表面粗さ、表面形状や接触力分布の計測を行う試みが出てきた。

・触運動型触覚センサ

触覚は視覚や聴覚と異なり、物体に触れ動かすことによって初めて物体の形状、硬さ、表面状態等を検出できる感覚であり、動かす時の能動性が重要な意味をもつ感覚である。人間の指先の空間分解能力は2mm程度であるが、指を動かすことによって表面仕上げの専門家等は数ミクロン程度の粗さを検出できるのはこの能動性のおかげである。これまでに触運動型触覚センシングについては多くの研究がある。1例として、昆虫の触角にヒントを得て、線状の触子で物体に触れ、トルクを加えて触子を若干変化させ、触子の根元に取り付けた角度とトルクセンサから接触位置を検出する方法等が提案されている。

力覚センサ

力覚センサは、各関節に加わる軸力即ち、直交座標系の3軸方向の力と3軸方向のモーメントを検出する。このため、6軸センサと呼ばれる。力覚センサの動作原理は外力によって発生する構造体の変形を利用する。実用化されている構造としては、ビーム型と並行平板型に大別できる。荷重を伝える2つの剛体間に変形が起りやすいビーム構造とし、ビームに歪ゲージを貼り付け、歪を計測することから外力を計測する。

【引用】下条誠（東京電気通信大学電気通信学部）、「皮膚感覚センサの現状」、静電気学会誌・26.3（2002）119-123

4.3.2 センサグローブ・サイバークローブ

電気通信大学下条研究室では、触覚すなわち人間とモノとの触れ合いを中心としたヒューマンインターフェースの研究を行っている。ここではその中で人間が手でモノを掴むときの機能を解明するために開発したシステムについて述べる。このシステムは人がモノを握るときの手指の形、力の入れ方、手首の動作を操作者の画像データと共に全てを同時に計測・記録する。人がモノを「手指でどのように(形)」、「どのくらいの力で(力)」、「どういう具合に(動き)」、握るかを計測・解析することから人間の把握メカニズムを研究し、把握機能の解明を行うものである。

把握の研究は、第一次世界大戦後に義手の研究として開始されこれまでに数多くの研究がある。しかし、多くの研究は、手の形態から見た手の働きの分類と解析の研究であり、どのような力の入れ方でモノを掴んでいるかの視点からの研究は見かけたことがない。この原因は、このような手指による力の入れ方を正確に違和感無く計測できるセンサがなかったことによる。

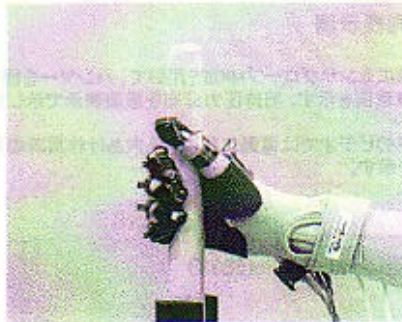


図3 - 4 - 2 センサグローブ

電気通信大学下条研究室は、従来から行っていた触覚センサ技術を応用してこの問題に対応した。

まずこの計測で必要になることは、人間の皮膚のように薄く、柔軟な圧力分布センサを作ることにある。我々はこれまでに厚さが0.7mmと薄く、柔軟性がありかつ大面積可能な圧力センサを開発した。

今回このセンサ技術を発展させ、手袋状にセンサを作り把握状態を計測可能なセンサグローブを開発した。このセンサグローブをサイバークローブと言われる把持形態を計測するグローブの上に装着することで把持形態と把持圧力分布の両方が計測できる。把握の形態、圧力分布、手首の位置方向、動作画像データを全て計測可能な本システムは、人間の把握状態の計測システムとしては世界唯一のシステムであろう。現在、住居の内部の手摺の評価をこのシステムを用いて行う試みを計画している。

本研究の成果は、人間が各種のモノを握って操作したときに感じる把握感覚の評価を通して、各種の把握を伴う製品の評価およびその設計支援システムとして広範な利用が期待される。また、このほか福祉関連への応用として、手指機能に障害がある方の手指機能の診断及びリハビリテーションへの利用が考えられる。手は第二の脳であると言われている。多指による協調動作機構の巧妙さ、そのセンサ系としてのすばらしさなど、奥が深くおもしろい研究分野であると言える。

Sensor glove MK III の圧力検出点は全部で 103 点である。(各指先が 4 点, 各指関節間に 3 点,

母指球に 10 点, 掌が 46 点)。金メッキした導線を感圧導電性ゴムに縫いつけ, その交点で感圧部を構成

・電気通信大学下条研究室

<http://www.kajitani.mce.ucc.ac.jp/study-shmj/HumanInterface/handJP.html>

4.4 まとめ

触覚は触った対象物の接触力や温度を直接検出するのではなく、自分自身の皮膚の変形や熱伝導といった非線形変換を介して自己を計測する感覚である。つまり、対象物の表面がつるつるか、ざらざらかを知覚する際には、皮下に埋め込まれた触覚受容器では、皮膚表面の接触圧分布や温度分布といった外界の物理量ではなく、皮膚がどのように動的に変形したか、どのような温度になっているかという自己の状態を実は検出しているのである。このことは、内部観測が困難である上、個人差の影響が顕著である(たとえば皮膚の弾性率は加齢とともに数 10 倍も変化する)。さらに皮膚に接触した対象物の形状や弾性分布、こりやしこりのような対象物内部弾性分布、「つるつる」「ざらざら」といった触感などの情報は、指や手のひらを能動的に動かす機械的運動を伴わなければ検出できない(引用: 前野隆司、「ヒトの触覚受容機構 - 力学・アナロジー・錯覚という視点から」)

皮膚の感覚受容器はその機能から、主に触圧覚、温覚、冷覚、痛覚の 4 種類に分類される。触圧覚受容器は温覚、冷覚、痛覚等に比較して研究が進んでいる。人間の皮膚感覚は、センサとして考えてみると複数の検出器が、皮膚という柔軟で薄いシート状の中に高密度で配置された構造になっている。検出器の機能に関してはこれを工学的に作るのはさして困難ではない。人間の感覚受容器は、荷重の変化に反応するもの、振動に敏感なもの、体温より高い温度に反応するもの、体温より低い温度に反応するもの等に役割が分かれている。これらをセンサとして実現するのは可能で、実際に実現した例もある。しかしながら、以下のような条件で実現させるのが現在の技術では非常に困難であると考えられる。

センサは皮膚のように柔らかく、薄く、広い自由曲面を覆える。

センサは各種検出器が高密度に配置されている。

センサは物理的・化学的な破壊に対して耐久性がある。

【引用】下条誠(東京電気通信大学電気通信学部)「皮膚感覚センサの現状」、静電気学会誌・26.3 (2002) 119-123

バーチャル空間での既往の触覚等の提示技術はデジタルハンドに触覚・力覚を取り込むときの有用な技術となり得ると考えられる。しかし、皮膚感覚を実用的なセンサとして実現するため

には、柔らかい自由曲面を形成できるセンサを高密度に配置する必要がある等、現状の技術では非常に高い課題を解決しなければならない。

第5章 人体 CG 表現技術の研究開発動向

5.1 研究開発動向概要

手の機能モデルをささえる提示技術として、リアルな CG (コンピュータグラフィック) 技術が不可欠であり、この人体 CG 表現技術について、既往技術の状況を把握するために、インターネット検索、技術文献データベース (JOIS) 検索を行った。また、産業レベルでの研究・実施例を把握するため、特許庁 IPDL (特許電子図書館) の特許検索 (過去 5 年間) を行った。

リアルな形状の手の CG モデルが市販されている。

動きを伴うものについては、筋骨格モデリング、バイオメカニカルモデル等の研究が行われている。

手の技能伝承のためのデジタルヒューマンハンドモデルの提案が行われている。

可視化ソフトを制作 (マウス操作とのインタラクションを表現)

モデルの (自動) 生成方法、三次元表示方法、3D モデル、CAD システム、VR モーション生成装置に関する特許が出願されている。デジタルハンド (手 * コンピュータマネキン) に関する出願は検索できなかった。

人体 CG 表現技術はデジタルハンドの形態再現に有用である。しかし、標準的な形状に留まり、関節特性を反映する等、人間らしい動きを伴う CG 技術は市場には見られない。

5.2 モデリング

5.2.1 デジタルハンドモデル (例)

手技 (ギター演奏)

複雑な人の手の動作について、ギターの左手のポジショニングの研究を行った。最初に、手のアニメーションモデルに指の動きを与えるためのデータに基づくアルゴリズムの記述を行った。その後、ギターで楽譜を演奏するための駒を押さえる指の動作を生成するためのアルゴリズム (Procedural Algorithm) を作製した。音楽教育や楽器演奏のテクニックを分析するためのツールを提供することを目的としている。同時発生的な動作に対する骨格 (関節) の動きの制約の構造や、モーションキャプチャで手順を調べるミュージシャンやアニメーターに対するツールに役に立つ。

【引用】 George ElKoura, Karan Singh (University of Toronto): "Handrix: Animating the Human Hand", In: Proc. Eurographics/SIGGRAPH Symp. on Computer Animation 2003

<http://www.dgp.toronto.edu/~gelkoura/handrix/paper.html>

<http://www.dgp.toronto.edu/~gelkoura/noback/scapaper03.pdf>

5.2.2 バイオメカニカルモデル(例)

解剖学的構造に基づく手のモデル

筋肉の収縮データによる制御、すなわち筋収縮データを皮膚及び骨格の動きに変換したハイブリッドな筋骨格モデル Pseudo muscle (擬似的な筋肉) が解剖学データと機械的法則に基づき骨の回転を直接制御する。一方、Geometric muscle (幾何学的な筋肉) が質量 - スプリング系を用いて皮膚組織を変形するようにしている。このようにして、指の動きを解剖学的及び物理的に正確にアニメートできることを示した。また、写真から個人のハンドモデルを作成する変形技術を提案している。

【引用】 Irene Albrecht, and Jorg Haber, and Hans-Peter Seidel, "Construction and Animation of Anatomically Based Human Hand Models". In Proc. Eurographics/SIGGRAPH Symp. on Computer Animation 2003, pp.98-109,368
<http://www.mpi-sb.mpg.de/~albrecht/SCA2003.pdf>

有限要素法を用いた手の変形モデル

物の把持における手の皮膚変形のモデリングを行なっている。このために、筋肉の変形及び物と接触をモデリングするための有限要素モジュールの開発を行った。ロボットや人間の動作で通常用いられる力の代わりに、変形による問題解決を行なっている。ボールの把持や押し付けに適用した結果を示している。

【引用】 Jean-Paul Gourret(MIRALab), Nadia Magnenat Thalmann(Univ. of Geneva), Daniel Thalmann(Swiss Federal Instit. of Tech.) "Simulation of Object and Human Skin Deformations in a Grasping Task"
<http://ligwww.epfl.ch/~thalmann/papers.dir/SIGGRAPH.89.FEM.pdf>

DFFD (Dirichlet Free-Form Deformation) を用いた手の変形モデル

従来の FFD (Free Form Deformation) に、"Delaunay & Dirichlet/Voronoi diagrams" に基づく散布データ補間技術を組み合わせた方法 (DFFD) を報告している。この方法は従来の FFD がない機能の拡張が可能となる。このモデルを手のアニメーションに適用し、皮膚と骨格の間の多層変形モデルの改良を行なった。

【引用】 Laurent Moccozet(MIRALab-CUI), Nadia Magnenat Thalmann(Univ. of Geneva), "Computer Animation '97 Dirichlet Free-Form Deformations and their Application to Hand Simulation"
<http://www.miralab.unige.ch/papers/119.pdf>

5.3 可視化ソフト

デジタルハンドは、統計データに基づく寸法形態、モノを握ったり把持したりする時の様々な姿勢 (Posture)、関節特性を反映した動作生成、力や負担感、手指の変形による摩擦特性や触覚、また慣れや心理的な認知特性等の機能を有する製品設計のためのツールを目標としている。全身型のコンピュータマネキンが一部の開発現場で使用されているものの、一般的に普及していないため、認知度が低いと同様に、デジタルハンドについてもどのような目的のもので、どのような機能を発揮するかについても、言葉や単純な図では一般的に理解を得にくい。

このため、デジタルハンドに関する用途、必要な機能、要求条件、期待する効果等について、手のインタフェースを有する製品の企業にヒアリングを行う時に、正確な意見・コメントを引き出すためには、その形、機能、特徴等をビジュアルに提示して、各企業の関係者に共通のイメージを植え付けることが必要である。

そこで、本調査研究においては、以下のような内容の可視化ソフト (Digital Hand Viewer) を製作して、企業ヒアリング等のプレゼンテーションに活用した。

(機能)

- ・手の形状表示 (回転、拡大・縮小)
- ・骨格表示 (シースルー及び骨格のみ)
- ・関節リンク表示 (シースルー及びリンクのみ) ただし関節特性は反映なし
- ・マウスと同一の画面表示 (握り等のインタラクション機能なし)

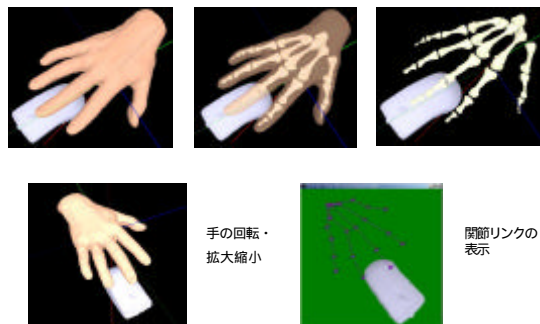


図3 - 5 - 1 デジタルハンド可視化ソフト

5.4 まとめ

デジタルハンドを実現するためには、リアルな手のCG（コンピュータグラフィック）技術が不可欠である。ゲーム用やCGデザイナーのための人体の仕組みの教科本等に、実物と見まごうばかりのリアルな手のコンピュータモデルが再現されている。しかし、これらは単に手指の形を表現しているに過ぎず、手の様々な寸法形態、筋骨格特性、関節の動き等の手の特性を反映したものではないため、何かぎこちないところを感じられる。

また一方では、筋骨格モデリング、バイオメカニカルモデル、コンピュータモデルに人間の手指の触感覚や摩擦特性を組み込む研究が、大学や研究機関において行なわれている。

これらのCGによる手の表現技術、人間特性をコンピュータモデリングする技術については、今後のデジタルハンド技術を開発するときの重要な基盤となると考えられる。

第6章 デジタルハンド技術を利用する時の産業界のニーズ調査

6.1 アンケート調査の概要

6.1.1 調査の目的

自動車等のヒューマンインタフェースの設計に使われているコンピュータマネキンにも手のパーツはあり、指が動くものがあるが、寸法形状、動作生成、手の機能再現については、必ずしも十分ではない。この部分を独立させた「デジタルハンド」技術を実現するための技術的課題、産業界のニーズ、デジタルハンドに対する要求事項や仕様等について把握する。

6.1.2 調査の項目

- ・ コンピュータマネキンの利用状況
- ・ デジタルハンドの必要性・用途
- ・ デジタルハンドの要求機能・仕様・期待する効果

6.1.3 調査の概要

配布先	・ HQL NEWS (HQL 会員企業及びメール配信登録者 約 600 件) ・ HQL のホームページに掲載 ・ コンピュータマネキンのユーザー等 ・ 産業技術総合研究所デジタルヒューマン技術協議会会員
期 間	調査票配布：平成 15 年 10 月 1 日～ 11 月 28 日
回答数	29 通

上記の企業を対象に、電子メールを送信し、メールもしくは F A X にて回答を回収した。また(社)人間生活工学研究センターのホームページ(<http://www.hql.jp/>)にアンケート文を掲載し、回答を募集した。その結果、29 件が回収できた。無効回答がなかったため、29 件全てを集計・解析の対象とした。

回答者の業務内容は主に企業の製品開発、企画が多いが、職種に関しては、機械を扱うという共通項以外、多岐にわたっている。得られた回答の中では、自動車関係の業種が多く、人間工学から、カーナビ・カーオーディオなどの具体的な車載機器のデザイン開発にまで及んでいる。

6.1.4 デジタルマネキンの利用状況

6.1.4.1 デジタルマネキンは利用されているのか

回答者に対して、現在業務においてコンピュータマネキンを使っているかどうかについて尋ねた。回答は表 3 - 6 - 1 のとおりである。

表3 - 6 - 1 コンピュータマネキンの利用状況

	回答内容	回答数	割合
1	利用している	5	17.9%
2	利用する予定がある	2	7.1%
3	今後利用したい	12	42.9%
4	今後利用する予定がない	9	32.1%
5	もしくは利用したくない	0	0%
	合計	28	100%

回答項目は現在、使用しているかどうかといった単純な質問ではなく、近い将来において利用する可能性が存在するかどうかを含めた内容となっている。1から3までの「現在利用している」あるいは「これから導入、または導入に前向き」といった回答が全体の7割強を占めている反面、「今後利用する予定がない」という回答も3割強を占めている。

6.1.4.2 デジタルマネキンの利用方法

6.1.4.1の枝問として、「利用している場合はどんな業務に利用しているか」の質問を行なった。その結果、表3 - 6 - 2のような結果となった。

この項目は、上記6.1.4.1の設問の「1 利用している」項目の回答者を対象者としていたが、それ以外の項目の回答者が回答しているというパターンも見られた。対象者以外は除外するのが本来ではあるが、「将来導入した場合、どのように利用するのか」についての回答と考えられるので回答の一部として集計することにした。なお、コンピュータマネキンを現在利用している企業だけの利用方法は表3 - 6 - 3に掲載した。

表3 - 6 - 2 どのように利用しているか（全回答者）

	回答内容	回答数	割合
1	設計業務	5	26.3%
2	試作	1	5.2%
3	試験	4	21.1%
4	意志決定	4	21.1%
5	製造ラインの検討	1	5.7%
6	その他	4	21.1%
	合計	19	100%

（注）回答者数11名（複数回答）

表3 - 6 - 3 どのように利用しているか（コンピュータマネキン利用者）

	回答内容	回答数	割合
1	設計業務	3	25%
2	試作	1	8.3%
3	試験	3	25%
4	意志決定	2	16.7%
5	製造ラインの検討	1	8.3%
6	その他	2	16.7%
	合計	12	100%

注：回答者数12名（複数回答）

利用方法については、ほぼ全ての項目が満たされているが、全体的に顕著な傾向として「1 設計業務」が多くあげられている。これは設計の初期の段階で、大まかな目安を得るため等にコンピュータマネキンが使われていることが考えられる。また試作と試験は多くの時間と人的な労力が必要とされるため、これらの短縮を行うためにも使用されていることが伺われる。

6.1.4.3 回答企業の「手で操作する自社製品」の有無

回答企業の中で、手で操作する製品を自社製品として開発したか、あるいは開発する予定があるかどうかについて尋ねた。回答は以下のようになった。

表3 - 6 - 4 手で操作する製品

	回答内容	回答数	割合
1	現在ある	20	69%
2	今後予定している	3	10.3%
3	現在・今後ともない	6	20.7%
	合計	29	100%

手で操作する製品が「現在ある、あるいは予定している」と「予定はない」の比率が、おおよそ4：1となった。また手で操作する製品の内容に関しては表3 - 6 - 5の結果となった。

表3 - 6 - 5 手で操作する製品内容

	回答内容	回答数	割合
1	携帯電話	8	18.2%
2	カーナビ	10	22.7%
3	リモコン(電器製品)	8	18.2%
4	内視鏡などの医療機器	3	6.8%
5	その他	15	34.1%
	合計	44	100%

(注) 回答者数 23 名 (複数回答)

6.1.4.4 製品評価について

では、こうした製品に対する操作性において、どのような評価法を取っているのかについて質問した。ただし、質問内容は「手の操作性に関するインターフェースについて、現状でどういう評価を行っていますか」という文章を用いた。

その回答結果は表3 - 6 - 6の通りである。

表3 - 6 - 6 手で操作する製品の評価方法

	回答内容	回答数	割合
1	モックアップによる実験	19	37.3%
2	経験的	12	23.5%
3	社内基準	11	21.6%
4	特になにも行っていない	0	0%
5	その他	9	17.6%
	合計	51	100%

(注) 回答者数 24 名 (複数回答)

製品の評価方法については、モックアップ (試作) による被験者試験、各企業の基準や経験等により行なわれているのが現状である。特に何の評価も行わないという回答者はなかった。

6.1.4.5 まとめ

コンピュータマネキンを利用企業が少なく、認知度も低い。そのため、アンケートにおいても、今後利用する予定がない企業が3割弱を占めた。しかし一方、今後利用したいという企業が多く存在している。自動車を中心としたコンピュータマネキンの企業における利用方法は多岐にわたっている。

手で操作する製品も、非常に多岐にわたっている。しかし、それらの製品の開発・試作段階における評価は、モックアップ (試作) による被験者試験、社内基準や経験による評価が主であり、デジタル的な設計開発技術の適用が遅れていることが分かった。

6.1.5 デジタルハンドについて

6.1.5.1 デジタルハンドに望むもの

デジタルハンドの必要性（ニーズ）について質問した結果は表3 - 6 - 7になった。

表3 - 6 - 7 デジタルハンドのニーズ

	回答内容	回答数	割合
1	是非ともほしい	6	25%
2	あればいい	12	50%
3	どちらでもない	5	20.8%
4	あまり必要と思わない	0	0%
5	無くても困らない	1	4.2%
	合計	24	100%

この結果、「是非ともほしい」「あればいい」という回答が75%を占めていることは、デジタルハンドに対する期待が高いことがわかる。

次に、製品の機能として何が望まれるのか、について質問した結果（複数回答）が表3 - 6 - 8である。

表3 - 6 - 8 デジタルハンドの要求機能

	回答内容	回答数	割合
1	寸法統計による形状再現機能	16	16.8%
2	握りや把持の手の運動生成機能	19	20%
3	マウス操作等の指先の精緻な動作機能	9	9.6%
4	把持時の力の再現機能	16	16.8%
5	触覚等の感覚機能	13	13.7%
6	負担感などの評価機能	16	16.8%
7	その他	6	6.3%
	合計	95	100%

（注）回答者数22名（複数回答）

「握りや把持の手の運動生成機能」「寸法統計による形状再現機能」の基本的な機能に加え、「把持時の力の再現機能」「負担感などの評価機能」「触覚等の評価機能」の手に本来必要な機能への要求が集中している。また、「マウス操作等の指先の精緻な動作機能」に関する要求も少ない。

6.1.5.2 ソフトとしての要求性能

デジタルハンドに対する要求性能について質問を行なった結果（複数回答）を表3 - 6 - 9に示す。

表3 - 6 - 9 デジタルハンドに対する要求性能

	回答内容	回答数	割合
1	精度	15	25.9%
2	ソフトウェアとしての使いやすさ	16	27.6%
3	ソフトウェアとしてのカスタマイズ機能	12	20.7%
4	プレゼンテーション機能	13	22.4%
5	その他	2	3.4%
	合計	58	100%

（注）回答者数 22 名（複数回答）。

回答は、「ソフトウェアとしての使いやすさ」「精度」「プレゼンテーション機能」「ソフトウェアとしての使いやすさ」の順に回答数が多くなっているが、全般的に全ての性能を平均的に必要とする傾向が見られる。

（選択項目の用語の説明）

- 2：ソフトウェアとしての使いやすさ（ソフトウェアのユーザインタフェース、データ形式や機能が使いやすく設計されているか）
- 3：ソフトウェアとしてのカスタマイズ機能（ソフトウェアの機能や表示形式などをユーザの利用目的に即するように修正できるか、あるいは、ユーザの持っているノウハウをソフトウェアに組み込めるか）
- 4：プレゼンテーション機能（デジタルハンドで模擬した結果を、利用しやすく分かりやすいかたちでコンピュータグラフィクス表示したり、あるいはバーチャルリアリティ技術で体験したりする機能が備わっているか）

6.1.5.3 まとめ

コンピュータマネキンを利用している企業だけでなく、手で操作する製品を有する企業において、デジタルハンドを必要とする割合が75%と非常に高いニーズがあることが分かった。

その機能に関しては、「握りや把持の手の運動生成機能」「寸法統計による形状再現機能」の基本的な機能に加え、「把持時の力の再現機能」「負担感などの評価機能」「触覚等の評価機能」等、非常に多くの機能再現が要求されている。

また、ソフトウェアとしての性能については、「ソフトウェアとしての使いやすさ」「精度」「プレゼンテーション機能」「ソフトウェアとしてのカスタマイズ機能」等の、全般的な性能を平均的に具備することが求められている。

6.1.6 デジタルハンドの効果

6.1.6.1 デジタルハンドの業務利用と効果

次にデジタルハンドの利用方法について質問した結果は表3 - 6 - 10のようになった。

表3 - 6 - 10 デジタルハンドの利用方法

	回答内容	回答数	割合
1	設計業務	16	33.3%
2	試作	6	12.5%
3	試験	11	22.8%
4	意思決定	8	16.6%
5	その他	7	14.8%
	合計	48	100%

(注) 回答者数 23 名 (複数回答)

「設計業務」「試験」に利用する回答が多くなっている。また、開発品を製品化するための「意思決定」に使用したいという回答も多くなっている。「その他」の自由回答には、「新製品発想」があった。

6.1.6.2 デジタルハンドの導入による効果

次にデジタルハンドの導入によって、どのような効果を期待するかについて質問を行なった結果を表3 - 6 - 11に示す。

表3 - 6 - 11 デジタルハンドの導入による効果

	回答内容	回答数	割合
1	設計工程の短縮	11	22.4%
2	試作行程の短縮	7	14.3%
3	試験行程の短縮	8	16.3%
4	意思決定に短縮	10	20.4%
5	販売促進ツール(プレゼン)	4	8.2%
6	その他	9	18.4%
	合計	49	100%

(注) 回答者数 17 名 (複数回答)

「設計工程の短縮」「意思決定の短縮」「試験工程の短縮」「試作工程の短縮」に効果が期待されている。一方、製造現場における設計開発業務以外に、ソフトウェアそのものを、販売時のプレゼン用ツールとして使用したい回答が多く寄せられた。「その他」の内容には、設計開発工程の短縮よりも製品の使い勝手評価の向上のための効果を期待する回答があった。

6.1.6.3 開発工程短縮期間

開発工程の短縮期間について質問した結果を表3-6-12に示す。

表3-6-12 開発工程短縮期間

	回答内容	回答数	割合
1	10%短縮	6	30%
2	20%短縮	4	20%
3	30%短縮	2	10%
4	40%短縮	1	5%
5	50%短縮	1	5%
6	その他	6	30%
	合計	20	100%

概ね10~20%の開発期間の短縮ができるとの回答になっている。中には、40%や50%の短縮が可能との回答もあった。「その他」の回答は、不明あるいはわからないといった内容であった。その回答の中に、以下のような回答があった。

- ・短縮よりも質を重視したい。質が悪いときに試作を繰り返すことと比較したら、試作回数分の短縮効果が期待できる。

6.1.6.4 デジタルハンドが生み出す経済効果

デジタルハンドの導入による開発工程短縮が生み出す経済効果について質問を行った。結果を表3-6-13に示す。

表3-6-13 デジタルハンドの経済効果

	回答内容	回答数	割合
1	直下コストの低減	4	12.5%
2	人件費の低減	3	9.4%
3	早期の製品市場投入	13	40.6%
4	宣伝効果	4	12.5%
5	その他	8	25%
	合計	32	100%

(注) 回答者数22名(複数回答)

「直下コストの低減」「人件費の低減」の製造コストへの直接的な効果を期待する回答があるが、早く開発して早く販売し、他社に先駆けて市場占有を図る「早期の製品市場投入」を期待する回答が集中している。

6.1.6.5 デジタルハンドの価格目標

「デジタルハンド（標準ソフトウェア）」の購入希望価格について質問を行なった。結果を表3 - 6 - 14に示す。

表3 - 6 - 14 デジタルハンドの購入希望価格

	回答内容	回答数	割合
1	50万円位	11	55%
2	100万円位	5	25%
3	300万円位	3	15%
4	500万円位	0	0%
5	1,000万円位	0	0%
6	3,000万円位	0	0%
7	その他	1	5%
	合計	20	100%

最も多かったのは50万円位であり、100から300万円にばらつきが見られる。このことから、デジタルハンドの標準ソフトウェアの目標価格として50万円から300万円の間が上げられる。一方50万円位の購入希望者が多いことから、簡易なバージョンを用意することも必要ではないかと考えられる。

6.1.6.8 まとめ

デジタルハンドは「設計業務」「試験」や開発品を製品化するための「意思決定」の業務に利用する回答が多い。デジタルハンドの導入による効果として、「設計工程の短縮」「意思決定の短縮」「試験工程の短縮」「試作工程の短縮」が期待されている。この開発工程について概ね10~20%の開発期間の短縮ができるとの回答が得られている。また、デジタルハンドの経済効果として、「直下コストの低減」「人件費の低減」の製造コストへの直接的な効果よりむしろ、「早期の製品市場投入」への期待が高い。デジタルハンドのソフトウェアの目標価格として、50~300万円があげられるが、50万円程度の低価格のものを希望する回答も多い。

6.2 デジタルハンドに対する要求仕様・課題等

6.2.1 製品毎の必要機能・要求内容

手をインタフェースにもつ製品は多いが、製品開発等にデジタルハンドの利用が期待される製品の中で、カメラ・事務機（コピー機）、自動車（カーナビ、インパネ）、日用品（洗剤やシャンプー等の容器）、箱・パッケージ、家電・携帯電話、医療機器（内視鏡）の代表的な企業にヒアリングを行い、デジタルハンドの用途、必要な機能、各製品に特有の要求項目、デジタルハンドに期待する効果等について調査を行い、デジタルハンドを実現するための、短期的な技術課題及び長期的な取り組み等について検討を行った。

6.2.1.1 製品毎の必要機能

製品毎の必要な機能を表3-6-15に示す。表中の記号「**A**」は産業界のニーズから優先度の高い機能、「**B**」は製品によっては必要な機能、「**C**」は必要であるが技術的ハードルが高い機能を表している。

表3-6-15 製品毎の必要な機能
A：産業界のニーズから優先度の高い機能、**B**：製品によっては必要な機能、**C**：必要であるが技術的ハードルが高い機能

製品 機能	カメラ・事務機	自動車（カーナビ、インパネ）	日用品（洗剤やシャンプー等の容器）	箱・パッケージ	家電・携帯電話	医療機器（内視鏡）
寸法						
姿勢						
動作生成						
関節特性						
力の再現						
負担感						
触覚						
摩擦特性						
認知特性						

（注）認知特性：慣れ、心理など

6.2.1.2 製品毎の用途・技術課題等

(1)カメラ・事務機（コピー機）

デジタルハンドの用途

- ・3DCAD で設計したものの操作性等の検証
- ・外国人の手の寸法形状の再現
- ・製品との手の干渉（接触面）の可視化（色分け等）

デジタルハンドに対する要求項目

- ・外国人も含めた手の寸法形状の再現
- ・皮膚変形
- ・製品毎の標準動作に対する動作生成

- ・既存ソフトとの互換性
- ・感覚（経験則の取り込み）
技術課題・問題点等
- ・カメラのグリップ形状が複雑なため、標準的な手の姿勢では評価がむづかしい。
- ・シャッター操作等のサブミリオオーダーの精度の確保
- ・初期的には、ある程度パターン化した動作生成に留まる。
- ・トナーカートリッジの取り出しの時の2段操作の再現

(2) 自動車（カーナビ、インパネ）

デジタルハンドの用途

- ・機器との干渉の評価（ステアリングから手を離して、インパネの小さいつまみを操作）
- ・負担の評価
- ・設計者がユーザーの多様な使い方をみる（ビジュアルイズ）ことによる新しい発想の転換
デジタルハンドに対する要求項目
- ・位置、姿勢、特に動作生成がないと使えない。
- ・ステアリング操作は手指だけでなく、肘まで含めた検討が必要
技術課題・問題点等
- ・初期的には、ある程度パターン化した動作生成に留まる。

その他

- ・使い勝手という新しい商品価値の創造

(3) 日用品（洗剤やシャンプー等の容器）

デジタルハンドの用途

- ・容器の握りや把持時の手の変形を考慮した力や感覚の再現
デジタルハンドに対する要求項目
- ・物を扱っている時の手の変形を考慮すること
- ・握りや把持の手の運動生成機能としては、解剖学的な見地からの動きやすさ、難しさ、動きの限界を考慮すること
- ・把持時の力の再現機能として、腕、手指について、多方向に最良、最悪条件での力が再現できること
- ・圧覚、痛覚、表面摩擦が考慮されたすべり感覚の再現ができること
- ・変形、動き、力から負担感が再現できること
- ・変形、動き、触覚的な観点からの快適性が考慮されていること
技術課題・問題点等
- ・容器を傾けて内容物が動く時の、手のつかみ方の変化や手の変形に対する対応
- ・日常的に老若男女が使用する製品については、様々な使用状態を考慮する必要がある。また洗剤等の容器は大型化し、かつ重くなり、内容物の消費により、容器のつかみ方や中身の取り出し方が様々に変化し、個人によっても一様ではないため、精密機器とは異なる難しさがある。

(4) 箱・パッケージ

デジタルハンドの用途

- ・日用品の箱や容器の持ちやすさ、開封性、取り出し易さ等の評価
デジタルハンドに対する要求項目
- ・握る（グリップ）、ふたを開ける（つまみ回し）、引き裂く（tear）等に容器や箱のあけ方の基本パターンの再現
- ・寸法形態と負担感の再現
技術課題・問題点等
- ・寸法形態と負担感等の再現ができれば、容器の形状設計やつまみ（ふた）の設計にデジタルハンドが使用可能。
- ・持ちやすさ、開封性、取り出しやすさ等の評価に数値的な基準の設定

(5) 家電・携帯電話

デジタルハンドの用途

- ・（初期的には）リモコン等の寸法形状のグリップ感の評価
- ・デジタルカメラや、冷蔵庫のドア把手、引き出し等の（繰り返し）動作に対する評価
デジタルハンドに対する要求項目
- ・リモコン等の寸法形状のグリップ感の評価
- ・デジタルカメラや、冷蔵庫のドア把手、引き出し等の（繰り返し）動作に対する評価
- ・加齢による身体機能低下（握力等）の再現
- ・外国人の身体寸法形態・負担感の再現
技術課題・問題点等
- ・リモコンの操作性評価等に、認知的要素（過去の経験）を如何に反映するか。
- ・個人のいろいろな使い方の取り込み

(6) 医療機器（内視鏡）

デジタルハンドの用途

- ・3DCAD で設計した内視鏡の操作性等の評価
- ・内視鏡ハンドリング部の構造や感覚の評価
- ・手術時の人間の手指の感覚の定量化（将来）
デジタルハンドに対する要求項目
- ・手の遠隔操作部分を CAD に取り込み、可能な動きを再現
- ・指の可動範囲や伸縮等の関節特性を反映した動きの再現
- ・最近の開腹を行なわない「マニピュレータ遠隔操作手術方式」の教育・訓練、患者への説明のための、医者の手とマニピュレータの動きのモデルがあればいい。
- ・メスで血管や筋肉を切るときの力、刃の角度、引っ張り速度を決めるための、動作時の定量的な手や指の知覚データを蓄積し、医者感覚に近いハンドリング性をデジタルハンドで評価する（究極の要求）
技術課題・問題点等

- ・内視鏡による医療現場は、どちらかといえば保守的（伝承的）であり、熟練の医者が自分で実際にメス、カンシ、針を持ち作業を行うときと同様の感覚を、遠隔操作部のハンドルに出来るだけ再現してほしいという要望があり、ハンドル部に密集している操作機構の配置、操作ロジック、ボタンの形状や大きさ等の複雑な条件に対する製品仕様だけでなく、個人的な要求に対する対応も考慮しなければならないという難しさがある。

その他

- ・胃カメラのような単純な内視鏡は技術的に確立
- ・マニピュレータ遠隔操作手術は、主に体幹部の消化器系臓器を中心に、開腹手術ほど術後の負担を患者に与えることなく内臓手術を行なうことができるが、どんな外科医にも行なえるものではなく、特殊な操作技術が要求される。モニターを見ながら操作を行い、開腹手術に比較して数倍の時間がかかるため、医者に対する負担が大きく、楽に操作ができ、負担を減らすための検討も必要とされる。

6.2.2 デジタルハンドの開発戦略

デジタルハンドを開発する上で重要なポイントは、以下の2点である。

計算機上に再現すべき機能は、単に手の生物学的な機能だけでなく、製品機能、製品と手の相互作用、そして、それを人間が知覚して評価する機能を全て含んでいる。

この4つの機能カテゴリーから、それぞれ最低1つ以上の機能要素がモデル化されないと、具体的な応用課題を解くことはできない。ただし、機能カテゴリー内にリストアップされた機能要素が全て揃わなくとも、解ける問題はあり得る。

この関係（計算機上で再現すべき機能）を図3-6-1に示す。

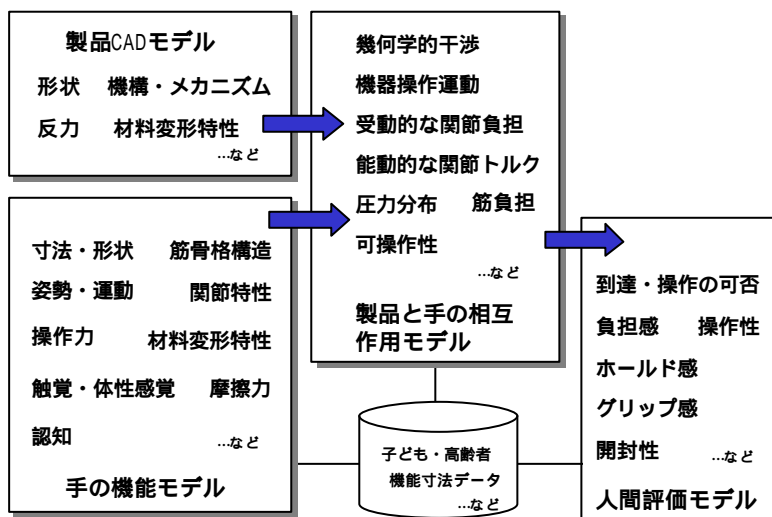


図3-6-1 計算機上で再現すべき機能

図3-6-2及び図3-6-3に機能モデルと応用事例を示す。これはいずれも赤枠の機能要素しかモデル化できていないという意味である。つまり、ほんの一部しか再現できていないが、

すべての機能カテゴリーにかならず1つは再現できている機能がある。そして、これを組み合わせると、具体的な応用課題が解ける。第1(図3-6-2)はボタンやプラグの間隔設計の問題である。これは、ほとんど幾何学的干渉問題である。ビデオの裏側でプラグを挿すときに、最後のプラグが挿しにくいという覚えはないだろうか。これは、そういう問題を解決しよう。第2(図3-6-3)はもう少し進んで開封性が解けるイメージである。これだと開けやすいパッケージデザインができるようになる。

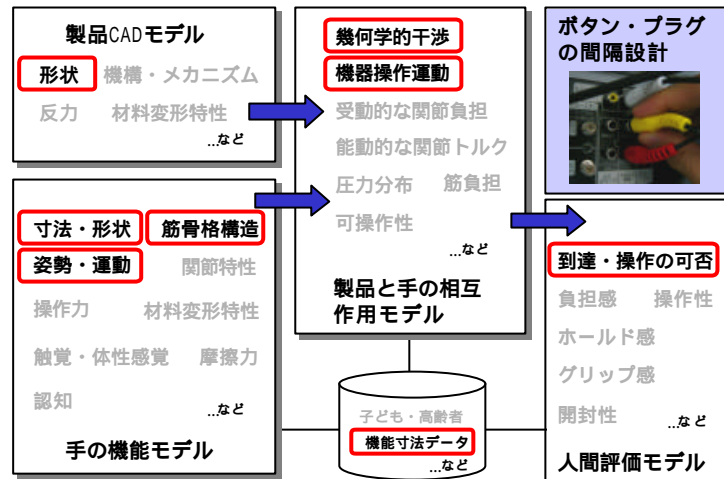


図3-6-2 機能モデルと応用事例(ボタン・プラグの間隔設計)

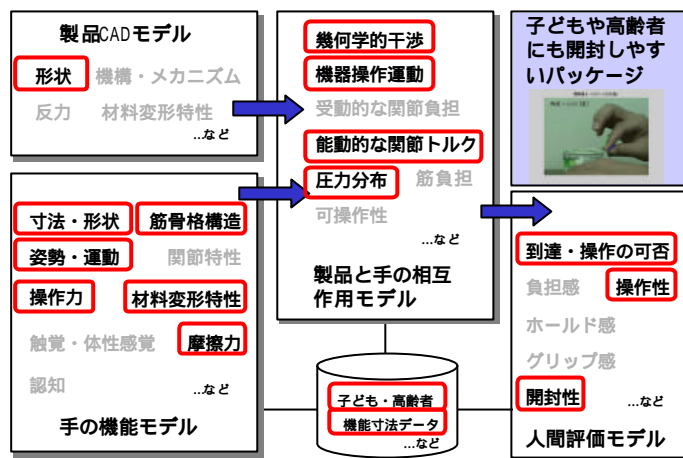


図3 - 6 - 3 機能モデルと応用事例（パッケージの開封性の設計）

「この4つの機能カテゴリーで、それぞれどの機能要素を、どの程度の精度で再現できれば、その組合せによって、このくらいの応用課題が解決できる」という時間経過をマッピングする開発戦略を立てることが重要である。組合せをいろいろ作ってみて、あとは技術的困難性の順番で並べればいいのかも知れない。単純にデジタルハンドだけの問題ではない部分もある。たとえば、製品CAD側に機構や反力などを記述して貰える仕組みができないと、最終的に相互作用が再現できないという場合もある。

6.2.3 まとめ

手をインタフェースにもつ製品は、カメラ・事務機(コピー機)、自動車(カーナビ、インパネ)、日用品(洗剤やシャンプー等の容器)、箱・パッケージ、家電・携帯電話、医療機器(内視鏡)等、多岐にわたることから、これらの新製品の開発工程における、製品(ハード)と手のインタラクションである操作性、使いやすさ、安定性、負担感等の評価のために、デジタルハンドは極めて有効な技術であると考えられる。代表的な製品の企業へのヒアリングにおいても、デジタルハンドに対する期待が高く、その内容も、開発初期の木製模型の削減から、寸法形状や姿勢の基本的な機能に留まらず、最終製品に近いモデルの操作性、負担感、様々な使い方の再現、従来製品との慣れに対する違いの評価等、むしろ高度な機能への期待が高い。

しかし一方では、コンピュータマネキンが自動車会社や研究機関等の特定の分野において使用されているものの、汎用的な設計ツールとしては普及していないことと同様に、「デジタルハンド」に関する認知度は低い。

デジタルハンドを開発する上で重要なポイントは、以下の2点である。

計算機上に再現すべき機能は、単に手の生物学的な機能だけでなく、製品機能、製品と手の相互作用、そして、それを人間が知覚して評価する4つの機能を全て含んでいる。

この4つの機能カテゴリーから、それぞれ最低1つ以上の機能要素がモデル化されないと、具体的な応用課題を解くことはできない。ただし、機能カテゴリー内にリストアップされた

機能要素が全て揃わなくとも、解ける問題はあり得る。

「この4つの機能カテゴリーで、それぞれどの機能を、どの程度の精度で再現できれば、その組合せによって、このくらいの応用課題が解決できる」という時間経過をマッピングする開発戦略を立てることが重要である。これには、企業にニーズがあり、優先的な機能としてあげられているところ、技術的困難性がさほど高くないところ等から技術開発を進める流れを構築し、効果的な製品分野への適用を行い、徐々に改良、適用拡大を行ないながら、認知度を高め、機能向上を図ることが重要ではないかと考えられる。

6.3 デジタルハンドの市場性について

6.3.1 実用化イメージ

6.3.1.1 製品開発における設計期間短縮へ向けてのデジタルハンドの利用

国内の家電メーカーにおける家電製品、リモコン、携帯電話等の設計開発工程では、新製品の早期投入、開発コストの削減を目指して、製品開発期間の大幅短縮を進めている。そのための方策としては、コンピュータを用いたシミュレーション解析により、試作実験を代替する方法が非常に有効な方策として効果を発している。新製品開発の段階で、数種類の試作品について、被験者実験による操作性等の確認を行い、改良を繰り返すことが一般的であるが、開発段階における試作は1回程度、もしくは試作をゼロにすることを目標としているところもある。

家電製品の操作部やリモコンボタン等の操作性のように、使用する個人の手の形状、巧緻性、感覚等に大きく影響される性能に関しては、現状の全身型コンピュータマネキンでの評価はむづかしく、このため、これらの評価を行うためには試作やモックアップを実際に作成し、それを用いて人間が評価を行うことが必要とされるため、製品開発期間の大幅な短縮を進める上で阻害要因の一つになる可能性が高い。このため、手に機能に特化した精緻なコンピュータマネキン（デジタルハンド）が必要とされる。

また、国内の自動車メーカーにおける設計開発工程においても、新製品の早期投入、開発コストの削減を目指して、製品開発期間の大幅短縮を進めている。10年前には新車開発の過程で、3段階程度の試作車を作成することが一般的であったが、現状では開発段階における試作は1回だけに限られているところが多い。将来的には、開発段階における試作車をゼロにすることを目標としている自動車メーカーもある。それを支える技術の一つは、シミュレーション解析技術の高速化と精度向上である。

一方、ステアリング、インパネスイッチ類、カーナビなどの操作性のように、使用する個人の体格、体力、感覚に大きく影響される性能に関しては、現状のコンピュータマネキンで動作のシミュレーションを行うことは可能であるが、その結果は精度が保証されたものではなく、実際の設計に適用することはできない。このため、これらの評価を行うためには、様々な手の寸法形態を再現し、ボタンの配置や空間位置を感覚的に検出する認知機能等を備えた高度なデジタルハンドが要求される。このようにすることにより、家電製品と同様に、内装機器類の製品開発の設計段階に利用できる精度の高いシミュレーション結果を得ることができ、試作、モックアップによる実験の代替となることで、自動車の製品開発期間の短縮に大きな効果を発揮することができると考えられる。

6.3.1.2 医療関係における利用

現状の商用ソフトではない機能だが、人体の臓器についても仮想表現の研究が盛んに行われている。患者個人の医用画像データから、解剖学モデルを構築し、それをを用いて本番前に手術トレーニングをするシステムが研究されている（山内，持丸，山下，橋本，森川，福井，宇野，横山：内視鏡下手術トレーニングシステム 6 軸力センサを用いた手術操作力の計測；日本コンピュータ外科学会 pp71-72（2001））。

現在、研究されているのは、主として解剖学モデルと、それに変形を考慮したモデルが中心である。将来的には、患者の心理負担やそれに応じた生理反応まで再現したモデルが必要となるだろう。

また、臨床の現場では、手術を行わずに、非侵襲に内視鏡を使うことが多くなっている。上部消化器系（胃など）や大腸用等の臓器の違いによる熟練者の内視鏡の操作を再現し、医療教育に用いるとともに、モニターを見ながら、実際の内視鏡操作を行う等の利用が考えられる。

6.3.1.3 リハビリテーションへの応用

デジタルマネキンとは、リハビリテーションの手の機能の回復過程を保存し、リハビリテーションの機能回復プログラムの構築に有効なツールとなる。

また、デジタルマネキンは、リハビリテーションの手技を可視化でき、リハビリテーション教育の教材として用いることができると考えられる。筋力をどう動かしたらより効果的か等を評価するリハビリテーションのシミュレートになる日も近いと考えられる。

6.3.1.4 スポーツ業界における利用

スポーツ業界におけるデジタルハンドの利用としては、スポーツ用具の開発、スポーツ技術向上のための野球のバットやゴルフのグリップの解析、スポーツ技術向上のための運動解析、スポーツ動作のアーカイブがあげられる。

6.3.1.5 個人フィット手袋製品における応用

手用の三次元計測器が開発されている（旭化成）。これは、個人の手の寸法形状を三次元的に計測を行い、個人の手にフィットした手袋の設計を自動的に行うものである。個人の手の寸法形態のデジタルデータが得られれば、手袋だけでなく、野球のグローブ等についても、ある程度カスタマイズされたオンデマンド的な製品の提供が可能となる。

6.3.2 産業波及効果

現状の課題を解決した本当の意味でのデジタルハンドが開発された時、携帯電話を例として、効果的に利用された場合の波及効果を検討した。

また、ソフトウェアのシステムあるいはモジュールとして、従来に無い新規の分野として、ソフトウェア販売分野、ソフトウェアカスタマイズ分野、エンターテインメント分野、フィットネス分野で、新しくビジネス展開された時に発生する波及効果について検討した。

ソフトウェア販売分野	20 億円
ソフトウェアカスタマイズ分野	54 億円
エンターテインメント分野	108 億円

以上の合計で、約 180 億円の市場規模が期待される。

6.3.2.1 携帯電話製品分野

国内の携帯電話の平成 14 年度販売台数は、39,389,100 台*であり、1 台の平均価格（ユーザー販売価格）を 30,000 円とすると、約 11,850 億円の大きな産業規模となっていることがわかる。

この携帯電話製品分野において、デジタルハンドの利用による波及効果を以下の点から検討した。

試作の削減	・・・ 5.2 億円（試作を 1 / 3 に削減）
実験工数・費用の削減	・・・ 8,800 万円（実験工数を 1 / 3 に削減）
設計変更作業の削減	・・・ 3,200 万円（設計変更を 1 / 3 に削減）
早期市場投入効果	640 億円（海外市場の 0.5% を約 1 年間獲得） 60 億円（国内市場占有率を 0.5% 拡大）
高付加価値化効果	60 億円（新規顧客層を 0.5% 獲得）

以上の合計として、携帯電話製品分野で年間 765 億円の効果が期待される。

* 日本経済新聞社「2004 年度版市場占有率」

(1) 試作の削減

携帯電話製品の設計開発を進める上で、人間特性との適合性を試験し、設計にフィードバックするために試作が行なわれる。

国内携帯電話産業において、1 年間に開発される新製品を 10 種類（NEC、パナソニック、シャープ、東芝、三菱電機の 5 社が各 2 機種 × 2 電話会社）と想定する。人間とのインタラクションに関

する試験のためとして、1機種当り設計初期のグリップ感等の評価を行うラフ木型 (@100万円 / 台 × 9台と想定) 及び商品化前段階での操作性試験用モデル (@1000万円 × 3台と想定) の試作が行なわれると仮定する。デジタルハンドの利用により、ヒューマンインタラクションに関する試作の数を1/3にすることができると考えると、年間に1社当り1.04億円の効果、携帯電話の主要5社では年間5.2億円の効果を期待することができる。

(2) 実験工数・費用の削減

試作の削減により、試作品を使用する実験回数が1/3に減少し、そのための人件費、被験者費用を削減することが可能である。

年間のヒューマンインタラクションに関する1機種当りの、実験・解析工数を3人 × 50日、被験者数を30人 × 2回と想定すると、試作品の実験・解析評価に必要な人件費は600万円 (@800万円 / 200人日 × 150人日)、被験者費は60万円 (@10,000 × 60日) の合計660万円となる。デジタルハンドを利用することにより、実験工数が1/3に減少することから、1機種当たり年間440万円、1社では、1,760万円 (440万円 × 4) となる。このため、5社全体では年間8,800万円の試験に要する費用の削減効果となる。

(3) 設計変更作業の削減

デジタルハンドを的確に利用することで、開発過程における設計変更を削減することが可能である。人間適合性に関する設計変更の回数を1機種あたり3回と考え、それがデジタルハンドの利用により1/3に減少できるとする。設計変更に必要な工数を20日、人件費を800万円とすると、設計変更作業の削減によるコスト低下効果は、1機種当たり160万円 (@800万円 / 200人日 × 20日 × 2回)、1社当り640万円 (160万円 × 4) と考えられる。このため、5社全体では3,200万円となる。

(4) 早期市場投入効果

デジタルハンドの利用により開発期間を短縮し、早期の市場投入を実現することが可能となる。特に、国内家電メーカーでの活用により、海外に向けての市場投入において効果が期待される。

例として、世界市場における2002年の携帯電話の出荷台数は423,418,500台* (1台を30,000円とすると127,000億円) である。海外メーカーに対して新製品の市場投入の時期を早めることができれば、1年程度の優位期間を得ることが可能と考えられる。その効果を、その期間の出荷台数の0.5%と想定すると、640億円の効果があると考えられる。また、国内市場 (約11,850億円) の占有率が0.5%拡大するとすると、約60億円の市場拡大につながる。

* 日本経済新聞社「2004年度版市場占有率」

6.3.2.2 ソフトウェア販売分野

デジタルハンドは、ソフトウェアのパッケージとして一般に販売されるものである。日本国内の CAD/CAM/CAE 市場は 2001 年度で 2,500 億円の規模と言われる。そのうち、既存の全身型コンピュータマネキンの市場規模は、10 億円程度であると言われる。

既存のコンピュータマネキンは自動車産業、製造現場等の限定した用途に使用されているが、手のインタフェースを持つ製品は多岐にわたり デジタルハンドは、これまでにない機能と精度を実現すると同時に、ユーザが使いやすいインタフェースを実現することになる。デジタルハンドの価格は全身型コンピュータマネキンの 1/3 程度の 300 万円が目標となり、既存のコンピュータマネキンの 3 倍程度販売量が期待できることから、既存のコンピュータマネキンと同程度の 10 億円の売上は確保できるものと考えられる。

システムパッケージとしての販売の他に、デジタルハンドを構成するソフトウェア技術をモジュール化し、それを他の CAD や CAE あるいは CG のソフトウェアベンダーに対して、ライセンスとして販売するビジネスを進めることが考えられる。3 次元の仮想空間上でリアルな手のモデルを表現する要求は、様々な分野で高まってきており デジタルハンド技術は筋肉も含めて人間のリアルな動きをもつ特性を表現可能とするものであるため、他の CAD や CAE、CG のソフトウェアと連携して利用することで商品の付加価値を向上させることが可能であると考えられる。モジュール販売ビジネスで、将来的に年 10 億円程度のビジネスとなることが期待され、パッケージと合わせて 20 億円程度の市場規模が発生すると考えられる。

6.3.2.3 ソフトウェアカスタマイズ分野

デジタルハンドは、動作を伴った人間の手の負担をシミュレートできるものであるが、解析の結果をどのように評価するかはユーザの独自の評価基準となることが多い。その評価基準は、企業のノウハウであることもあり、市販のシステムに組み込めるものでもないため、各ユーザー向けにデジタルハンドをカスタマイズする必要が生じる。

また、各ユーザが使用している CAD や CAE と デジタルハンドを連携させて、CAD で作成したモデルをデジタルハンドで利用し、デジタルハンドでの検討結果を CAE で利用するなど、ユーザ独自の利用方法を効率よく実行するためのカスタマイズ要求も高まることが予想される。

それらの必要性和要求に応えるために、デジタルハンドはカスタマイズ機能を備えるべきであり、それを利用してソフトウェアメーカーはデジタルハンドのカスタマイズを効率よく行うことができるようになり、ソフトウェアのビジネスとして一分野を確立することが期待される。

経済産業省の平成 13 年度情報処理実態調査によると、調査対象企業 (4,604 社) が年間に支出したソフトウェアの購入費と使用料の合計は、1 社あたり 5,521 千円。また、ソフトウェア作成委託料の合計は、14,713 千円である。基本ソフトウェアの購入に対して、ソフトウェアの開発を外部に委託する費用としては、約 2.7 倍の費用を支出している。

これより、デジタルハンドのパッケージ及びモジュール販売の規模を 20 億円とすると、関連するカスタマイズビジネスの市場規模として、54 億円程度が期待される。

6.3.2.4 エンターテインメント分野

デジタルハンドを利用して、よりリアルな人間の手のモデルをバーチャル空間上で実現し、エンターテインメント分野のビジネスとして従来にない高度なサービスを実現することが期待される。

実現方法の一つとして、ブロードバンドの急速な普及を背景に、デジタルハンドでの高度な動作生成を売り物にしたネットワークゲームへの適用が考えられる。

2002 年 11 月末現在の国内のブロードバンド加入者数は、ADSL、FTTH、CATV を合計して、7,191 万人である。ネットワークゲームの普及率を 5% と考え、月間使用料 2,500 円と想定すると、年間売上 10,787 百万円のビジネス規模の新規市場が考えられる。

6.3.3 まとめ

デジタルハンドを利用することにより、製品開発における設計期間短縮が可能となり、この結果としての、新製品の早期市場投入の期待が産業界において高い。

このデジタルハンドの製品開発における利用について、携帯電話を例とした波及効果の検討結果は以下のとおりである。

表 3 - 6 - 1 6 デジタルハンドの利用による波及効果（携帯電話例）

項 目	経済効果	備 考
試作の削減	5 . 2 億円	試作を 1 / 3 に削減
実験工数・費用の削減	0 . 8 8 億円	実験工数を 1 / 3 に削減
設計変更作業の削減	0 . 3 2 億円	設計変更を 1 / 3 に削減
早期市場投入効果	6 4 0 億円 6 0 億円	海外市場の 0.5% を 1 年間獲得 国内の市場占有率を 0.5% 拡大
高付加価値化効果	6 0 億円	新規顧客層を 0 . 5 % 獲得

また、ソフトウェアの新規市場として、ソフトウェア販売（20 億円）、ソフトウェアカスタマイズ（54 億円）、エンターテインメント（108 億円）の約 180 億円の試算を得ている。

デジタルハンドは、人間特性データベースとの連携による身体寸法・関節特性等のデータの相互交流、アジア圏の人間特性を考慮した製品開発への積極的な活用、個人の筋骨格系を反映したパーソナルハンドモデルのようなビジネス等、製品開発以外の広範囲な利用形態を推進することにより、市場が拡大するものと考えられる。

4 . 調査研究の今後の課題及び展開

携帯電話、カーナビ、リモコン、内視鏡等、機械システムの多くは、ユーザインタフェースとして、手で操作するインタフェースを備えているが、これらの機器操作において、手の大きさが合わずに使いにくい、指が届かない、グリップ感が悪い等、さまざまな問題が生じている。

このため、(社)人間生活工学研究センター(HQL)は、コンピュータ上に再現した手指により設計段階で、潜在的な問題箇所を洗い出すための「デジタルハンド技術」に関する、技術的課題、実現可能性、市場規模等の調査を実施した。

デジタルハンドとは、コンピュータ上に創り出す多様な仮想ユーザの手が、コンピュータ上に記述された機械システムに対して操作をすることにより、設計段階で機械システムの持つ潜在的な問題箇所を洗い出すための技術である。手で操作する機器のインタフェースについては被験者実験による評価が主であるが、代表例に留まり十分ではないため、デジタルハンド技術が確立されると、被験者実験を削減でき、さまざまな手の機能評価が短期間に行え、設計工程の短縮が図れる。

デジタルハンドに関連する各技術の現状と課題等、デジタルハンドを利用する時の産業界のニーズについての調査結果の要点は以下のとおりである。

(1) 手の機能計測技術の研究動向

手の寸法・形状、運動、筋負担、指先にかかる圧力分布、触感覚等の手の機能に関する計測技術について、手の寸法形状及び動作特性について公的機関が計測マニュアルを発行している。また、手の関節特性について、屈曲等の計測方法が提案されている。

(2) 手の機能データベースの状況

- ・ 6～90歳代の男女 34,000人について、HQL「日本人の人体計測データ」があり、手については39計測項目が掲載されている。
- ・ 900人規模の手関節特性データが製品評価技術基盤機構(NITE)のホームページに公開されている。
- ・ 手に関するデータベースは寸法についても、項目が少ない等、不十分である。寸法以外の関節特性、動作特性等のデータは無いに等しいため、収集・整備が必要である。

(3) 義手・ロボットハンドの開発動向

- ・ 義手やロボットハンドは、人間の手の機能に近いものが開発されるようになり、このための制御に触覚・力覚等をフィードバックするセンサ技術の研究が行なわれている。
- ・ 指の機能の向上については、指先の感覚が精緻であることと動きが複雑なため、ま

だまだ実用化のためには大きな課題が残されている。

(4) 仮想現実感における触覚提示技術の動向

- ・バーチャル空間での把持・操作の動作呈示、触覚呈示、力覚呈示のモデリングの研究が大学を中心に進んでいる。これらは、デジタルハンドに触覚・力覚等を取り込む時の有用な技術と考えられる。
- ・皮膚感覚を実用的なセンサとして実現するためには、柔らかい自由曲面を形成できる、センサを高密度に配置する必要がある等、現状の技術では非常に高い課題を解決しなければならない。

(5) 人体 CG 表現技術の研究開発動向

- ・手の形態を再現したりリアルな CG (コンピュータグラフィック) が市場に出ている。しかし、関節特性を反映する等、人間らしい動きを伴うものではない。
- ・筋骨格モデル、触覚・力覚等の感覚特性を反映したモデルの研究が大学を中心に行なわれている。

(6) デジタルハンド技術を利用するときの産業界のニーズ調査

- ・手で操作するインタフェースを備えている携帯電話、カーナビ等の製品に対する、デジタルハンドの適用、要件、期待する効果等について、産業界のニーズを把握するために、アンケート調査、ヒアリングを行った。
- ・アンケート調査結果から、70%以上の人々がデジタルハンドを必要としている、10~20%の開発工程の短縮が図れる、ソフトの販売価格は50~300万円の範囲、早期に新製品を開発して、他社に先駆けた市場投入効果を期待する意見が多数を占めた。
- ・企業ヒアリングの結果からは、ニーズがあり、デジタルハンドの優先的な機能として、寸法形態及び姿勢の再現、一部の動作生成があることが分かった。しかし、これらの基本的な機能だけでは、各製品開発に必要な要求を十分満たすことはできず、関節特性、力や負担感の評価、摩擦特性や触覚の評価等、人間特性の高度な評価を行う技術としての期待がある。

手をインタフェースにもつ製品は、カメラ・事務機、自動車のカーナビ、インパネ、日用品として洗剤やシャンプー等の容器、箱・パッケージ、家電製品・携帯電話、医療機器（内視鏡）等、多岐にわたることから、これらの新製品の開発工程における、製品と手のインタラクションである操作性、使いやすさ、安定性、負担感等の評価のために、デジタルハンドは極めて有効な技術であると考えられる。代表的な製品の企業へのヒアリングにおいても、デジタルハンドに対する期待が高く、その内容も、開発初期の木製模型の削減から、最終製品に近いモデルの操作性、負担感、様々な使い方の再現等、高度な機能を必要とする使い方まで、広範囲な用途が考えられる。

このため、以下のような取り組みを行う必要がある。

まず、手の機能に関するデータが少なく、手の詳細な寸法、把持姿勢、手指の関節特性、

触覚、力覚、指先の摩擦特性等の計測手法の確立、データベースの整備・拡充を早急に図る必要がある。

デジタルハンドに対する要求機能については、寸法形態、姿勢のように、比較的早期に実現が可能なものから、負担感や触覚のように、かなりハードルの高い技術課題のものまで含まれている。

デジタルハンドを開発する上で重要なポイントは、以下の2点である。

- ・ 計算機上に再現すべき機能は、単に手の生物的な機能だけでなく、製品機能、製品と手の相互作用、そして、それを人間が知覚して評価する4つの機能を全て含んでいる。
- ・ この4つの機能カテゴリーから、それぞれ最低1つ以上の機能要素がモデル化されないと、具体的な応用課題を解くことはできない。ただし、機能カテゴリー内にリストアップされた機能要素が全て揃わなくとも、解ける問題はあり得る。

「この4つの機能カテゴリーで、それぞれどの機能要素を、どの程度の精度で再現できれば、その組合せによって、このくらいの応用課題が解決できる」という時間経過をマッピングする開発戦略を立てることが重要である。これには、企業にニーズがあり、優先的な機能としてあげられているところ、技術的困難性がさほど高くないところ等から技術開発を進める流れを構築し、効果的な製品分野への適用を行い、徐々に改良、適用拡大を行いながら、認知度を高め、機能向上を図ることが重要ではないかと考えられる。

上記のような技術開発は、手指のデータベースの拡充、デジタルハンドに関する基本技術の研究等、民間企業だけで取り組むには無理があるため、産学官が連携したプロジェクトとして構築し、国等が主導的に実施することが必要と考えられる。

本調査研究の成果（要旨）は、（社）人間生活工学研究センターのインターネットホームページ（<http://www.hql.jp>）から公開を行なう他、産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターのデジタルヒューマン技術協議会における課題への取り込み、関連学会や業界のシンポジウム等に、積極的に報告を行なうことを検討している。

おわりに

デジタルハンドは、単に人間の手の構造・機能をコンピュータ上に再現するだけでなく、人間の手が製品のデジタルモックアップを操作するときの相互作用を模擬し、そのときに人間が知覚する操作性やグリップ性などを仮想評価する機能が必要であることが明らかになった。

このような技術の実現に必要な基礎的知見として、手の解剖構造・運動機能については医学・人類学の分野で定性的な知見が蓄積されているものの、構造モデルを構成するに足る定量的知見やデータが不足していることが分かった。また、触覚に関する有限要素法による応力解析や神経伝達系の解明は部分的なもので、触覚情報伝達・知覚系をモデルとして再現できるまでの総合的知見は得られていない。さらに、多様な動作戦略や摩擦、操作力などに関しては科学的な研究自体がほとんどなされていないことが分かった。一方で、触覚等を提示するバーチャルリアリティ技術や、手の形状や運動を提示するコンピュータグラフィクス技術においては、新しいアイデアや方法が続々と提案されており、研究が活性化している。特に、昨今のロボット技術の進展を背景とした義手やロボットハンドの技術的進展は際立っている。以上のことから、デジタルハンドの実現に向けては、手の構造・機能モデルを構成するための科学的知見と基礎的特性データの蓄積が急務であり、日本における技術の優位性を活かすにはバーチャルリアリティやロボット技術との連携が重要であると考えられる。

デジタルハンドを CAE ツールとして活用する産業界、特に、機械システム設計にかかる産業界のニーズとしては、手の寸法、形態、運動の再現、特にその個人差や多様性の再現が最重要課題として挙げられた。ただし、これらの手の構造・機能をモデル化するだけでなく、それによる機械システムの操作挙動を模擬した上で、そのときの操作性などを仮想評価するという一連の技術が完結しないと、機械システムの設計・評価ツールとして活用できないことが明らかになった。変形、摩擦、力覚、触覚機能再現に対する要望も大きく、寸法・形態の基本構造と並行してこれらの機能モデル構築の研究が必要であることが示唆された。

デジタルハンドを CAE ツールとして捉えたとき、その CAE ソフトウェアとしての単体市場は数 10 億円程度と決して大きなものではないが、これを活用することによって生じる機械システム市場における製品の早期投入効果、モックアップ削減によるコスト低減効果は数 100 億円規模になることが、市場予測シミュレーションで明らかになった。また、デジタルハンドを手の運動計測機器（モーションキャプチャ）と連携させ手の運動記述・再現ソフトウェアとして捉えると、伝統技能や職工手技の記録、手術シミュレーション、さらにはゲームやアニメーションなどのエンターテインメントにいたる波及効果が期待でき

る。波及効果が大きいことから、現在、全身型のコンピュータマネキンを開発する欧米各国も同様の技術に着目していると予想でき、日本における技術の先進性と知的財産の確保を確実なものとするためにも、早急かつ戦略的な研究開発が必要であろう。

デジタルハンド研究は、まだ産声を上げたばかりである。本研究調査の結果から、手の構造・機能、製品との相互作用、操作性などの仮想評価の3つの機能を、具体的な応用事例を定め、焦点を絞り込んで研究開発していくべきであることが明らかになった。特に、技術的な取り組みやすさ、応用展開の双方を考えると、手の寸法、形状、運動機能のモデル化と、製品を操作するときの挙動の模擬、さらに、そのときの操作性の仮想評価に最初のターゲットを定め、携帯電話やデジタルカメラのスイッチ配置など具体的な課題設定で研究を推進すべきと考えられる。操作性の計測・評価は人間工学分野でも研究されてきているが、「できあがった製品の操作性を計測・評価する」のではなく「人間が知覚する操作性を、模擬・予測が可能な人間と製品との物理的相互作用との関連づけでモデル化する」アプローチが不可欠である。モデル化と予測可能性を踏まえた従来の人間工学とは一線を画する研究アプローチが求められている。

- 禁無断転載 -

15 - R - 2

システム技術開発調査研究
デジタルハンド技術に関する調査研究報告書
- 要旨 -

発行 平成16年3月

発行者 財団法人 機械システム振興協会
〒108-0073 東京都港区三田一丁目4番28号
電話 03 - 3454 - 1311

社団法人 人間生活工学研究センター
〒541-0047 大阪府中央区淡路町三丁目3番7号
電話 06 - 6221 - 1660

本報告書の内容を公表する際は、あらかじめ上記にご連絡下さい。