Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

バイオメカニズム学会誌, Vol.14, No.3 (1990)

解 説

心理物理実験によるマン・マシン系の評価法

伊福部 達*

1. はじめに

人間が機械に接してそれを使うときには，手や足で機械を制御し，視覚や触覚など感覚を介して機械からの情報を得ている．人間－機械系の良し悪しを評価する上で，機械の発生する情報がいかに人間の感覚特性に適合したものであるかどうかを調べることが大切である．心理物理実験に基づいて人間－機械系を評価することは機械を設計する上では欠くことのできないものである．

この評価法は，とくに感覚補助・代行機器を設計する上で極めて重要な役割を果たす．幼いときに視覚や聴覚の機能を失うと，残された感覚の特性は健常者とは次第に異なってくる．感覚器の特性というよりは感覚情報を処理する大脳の機能が変化してくる．例えば，視覚を失うと聴覚を使って環境を認識する機能が健常者では想像もつかないほど優れてくるし，聴覚を失うと話者の微妙な唇の動きから音声を認識する機能が備わってくる．従って，どのように変化したかを正確に把握して始めて感覚補助・代行機器の設計ができるのである　そして，重要なことは視覚や聴覚を失ったことにより，残された感覚で新しく形成された概念を損なわないように，情報を与えることである．

また，感覚補助代行だけでなく心理物理実験による評価は，最近とくに注目されてきているサイバネティック・インタフェース，テレイグジスタンス・ロボット，アーティフィッシャル・リアリティイ，ヒューマン・コミュニケーションに関する機器を開発する上でも必要不可欠のものである．いずれも機械が検出したり発生した情報をできるだけ忠実に人間の感覚に呈示する方法を追究している．どのように呈示したら最適かを知る上で，感覚の心理物理評価は欠くことができない．

ここでは，我々の研究室で進められてきた感覚補助代行や人間－ロボット系の研究を通じて，これらの機器を設計する上で心理物理的評価がいかに重要な立場を占めているかを述べたい．

平成2年5月17日受付
＊北海道大学応用電気研究所
〒060 札幌市北区北12条西6丁目
キーワード：心理物理実験 (psychophysical experiment)，感覚補助代行 (sensory aids and substitutes)，マン・マシン系 (man-machine system)

2. 感覚補助代行における心理物理的評価

2.1 触覚における時空間特性の心理物理的評価

視覚や聴覚の補助代行として，まず，考えられるのは，普段あまり情報の受容経路としては使われていない触覚を利用する方法である．そのため，触覚を介してどのくらいの情報を伝達できるのかを正確に調べておく必要がある．

図1は指先の振動パターンの受容特性を調べるために開発した振動子アレイである[1]．これは1㎜おきに16列，3㎜おきに3行，合計48本の振動子が配列されている．この振動子からランダムに2個を選択して被験者の指先に振動 (200Hz) を呈示し，被験者にはそれらが分離して知覚することができたかどうかを答えてもらうという方法で「2点閾値」を調べることができる．これは被験者がやっと2刺激を弁別できるときの2刺激間の距離であり，触覚の空間分解能を表している．

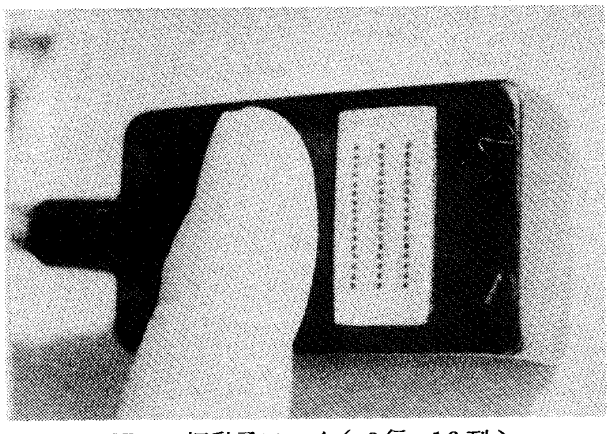


図1　振動子アレイ（3行×16列）

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

1点に刺激を与えてもそれが空間的に広がって知覚されるため，2刺激があると融合してしまう現象である．

図2 (a) の正の領域は，この2点弁別閾に基づいて1点刺激を与えたときに知覚される空間的な広がりを推定したものである[2]．また，振動子アレイの中から2個を選択し，一方を遮蔽刺激，他方を信号刺激として「マスキング実験」を行うと，空間的な抑制効果を知ることができる．図2 (a) の負の領域はマスキング実験を通じて推定した抑制の広がりを表している．正の領域も負の領域も正規密度分布関数で近似できることが分かっている．

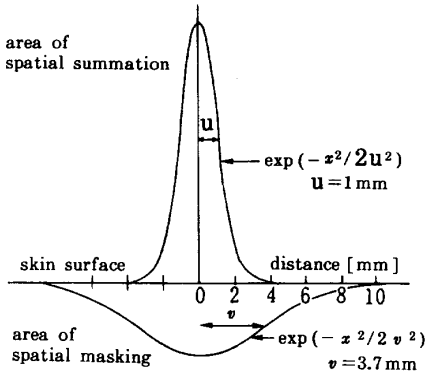


図2 (a) 指先の振動刺激に対する空間加重領域と抑制領域

このオペレータは，横軸を時間軸にしても同様な考え方で求めることができる．図2 (b) の正の領域は相続く2刺激 (20 msec) がやっと分離して知覚されるときの2刺激間の時間差を表しており，負の領域は「時間マスキング」から推定した抑制の及ぶ範囲を表している[3]．任意の振動パターンが呈示されたときに，図2のオペレータを作用させることにより，どのようなパターンとして知覚されるかがおおよそ検討がつく．このように，視覚や聴覚の代行として触覚を利用する場合には，心理物理実験に基づいてオペレータを見いだし，与えた刺激パターンがどのようなパターンとして知覚されるかを事前に評価することがまず必要になる．このような振動子アレイを利用する機器として盲人用読書器（オプタコン）が実用化されている．筆者らも約16年前にこの振動子アレイを利用して聾者用触知ボコーダを開発している[4]．

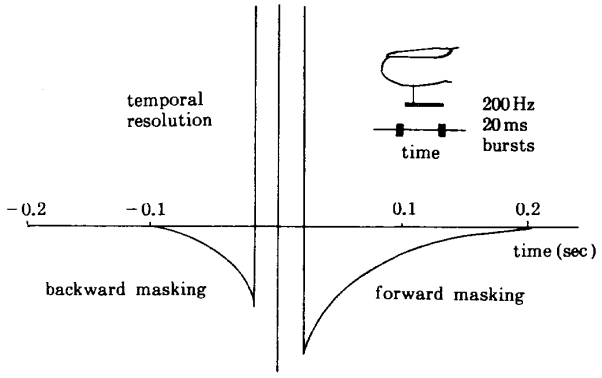


図2 (b) 指先の振動刺激に対する時間分解能と時間抑制領域

2.2 聴覚補助代行機器の設計のための心理物理的評価

触知ボコーダは音声を16段階に周波数分解し，さらに側抑制回路でホルマントや子音部を強調してこの振動子アレイに呈示しそれを一本の指先で識別させようというものである．触覚による聴覚代行の研究は最近諸外国で注目され研究者も増えている．ところで音声など音に関する記憶が脳の中に少しでも残っており，末梢の聴神経系が生きている場合，聴神経に直接電気刺激を与えて脳に情報を送ることができればその情報を記憶されている音声と結び付ける可能性がでてくる．このような考え方で人工内耳が各国で盛んに研究されている．この場合も，聴神経に与えた情報がどのように知覚されるかを事前に心理物理実験に基づいて徹底的に評価しておく必要がある．

図3は筆者らが開発した8チャンネル人工内耳の構成図を示したものである[5]．8段階に周波数分解した音声情報を電気刺激に変換し，蝸牛管内に挿入した8個の電極を通じて残存する聴神経を刺激する方法をとっている．ただし，このような人工内耳で実際にどの程度の音声識別能力があるかを評価するのは極めて複雑な問題である．いつ聴力を失ったかにより，残存聴力の量により，また，言語の違いにより評価の値は大きく変わってくるからである．

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

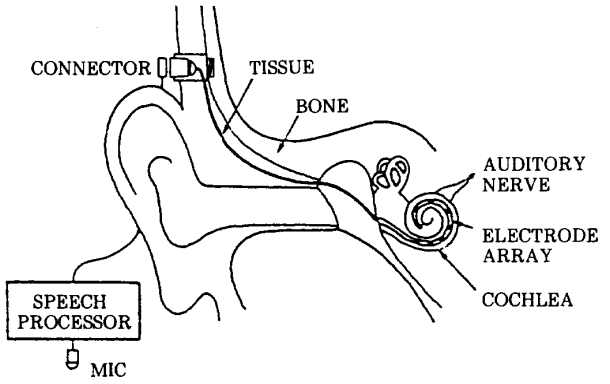


図3　8チャンネル人工内耳の構成図

できるだけ客観性のある評価法として合成音声を用いた例を示す．図4の中のV1…V7は作成した合成母音の第一，第二ホルマント周波数を示したものである．図から分かるように，合成母音はF1−F2平面上の／i／−／a／ラインの上に等間隔で並んでいる．評価実験ではV1からV7の内から一つをランダムに選びそれをテスト刺激として呈示し，標準刺激のV1と区別がついたかどうかを答えさせる「一対比較法」を用いた．

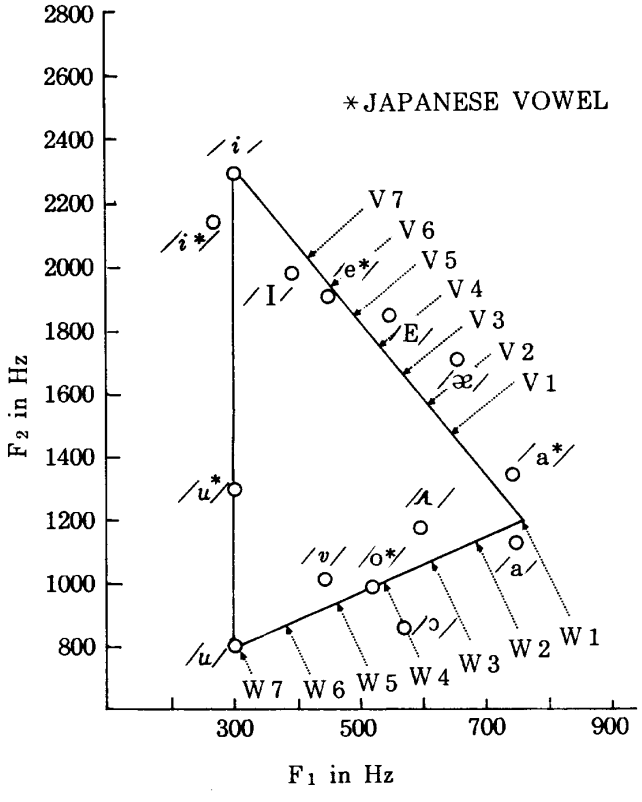


図4　合成母音のF1−F2平面上における位置

図5は実験結果の一例であり，縦軸が区別がついたと応答した確率を示しており，横軸はV1からの距離を周波数で表したものである．実線が人工内耳埋め込み患者の例であるが50％の弁別閾をみると大体320Hzになっていることが分かる．比較のために，8チャンネル触知ボコーダによる同様の実験を行った結果，図中の破線で示したように，人工内耳より母音弁別能が高いことが分かる[6]．人工内耳の場合，蝸牛管内の導電性のリンパ液の中で刺激電流が広がってしまい，そのため周波数分解能が低下するのである[7]．いずれにしても，違った種類の聴覚補助方式でも，合成音声を利用することにより客観性のある評価ができる．

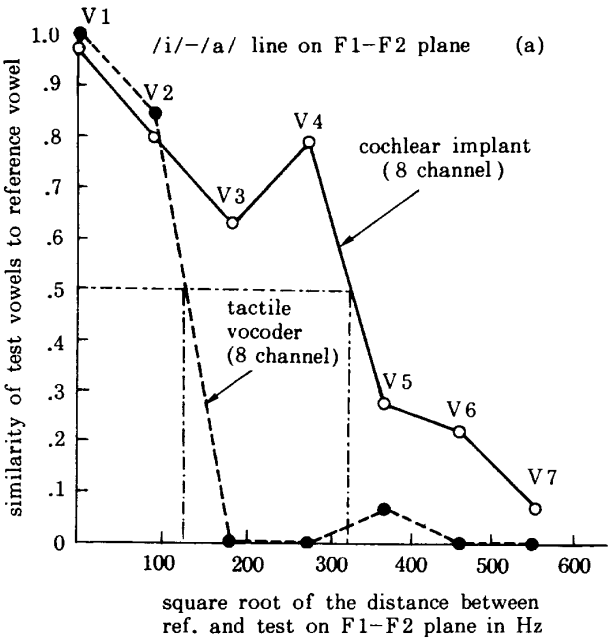


図5　合成母音の弁別特性（縦軸：標準刺激V1とテスト刺激が同じと答えた確率，横軸：F1−F2平面上のV1からの距離，触覚刺激と聴神経刺激の比較）

時間分解能についても同様に触覚と聴覚について一対比較法で評価することができる．図6の中に，1ミリ秒の間隔を持つダブルパルスを10ミリ秒のピッチで与えた時系列刺激と，その下にダブルパルスの間隔をさらに△tだけ長くしたものを示した．これらを聴覚障害者の蝸牛管に対にして

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

与え，2個の刺激が区別できたかどうかを答えさせると，図6のような結果が得られる．縦軸は2個の刺激が弁別できなかった確率で，横軸は△tを示している．比較のため指先の触覚でも同様の実験を行ったが，図から分かるように，聴神経刺激（実線）の方で△tが約150マイクロ秒となり，振動刺激（破線）より3−4倍弁別能が高いことが分かる[8]．

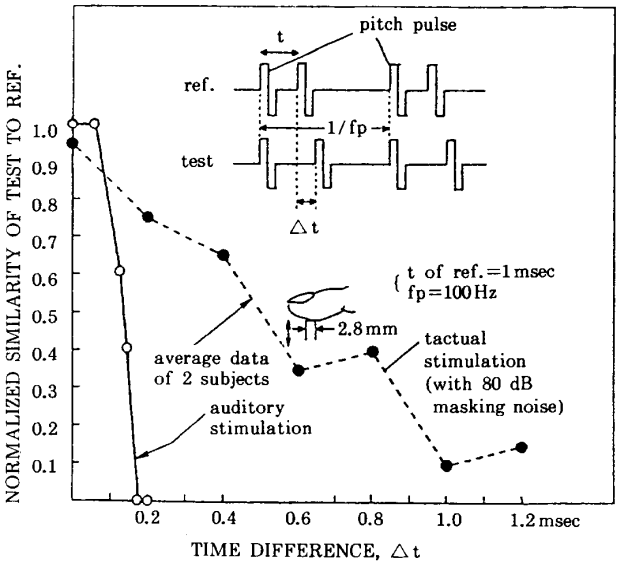


図6　時系列刺激の弁別特性（縦軸：標準刺激とテスト刺激が同じと答えた確率，横軸：△t，触覚刺激と聴神経刺激の比較）

以上，触知ボコーダや人工内耳を例にとってそれらを設計する上で事前に評価しておかなければならない心理物理実験について述べた．いうまでもなく，読話と併用した場合とか，連続音声の場合について認識特性を評価することが実用上絶対に必要なのであるが，その前に条件を厳密に設定した基礎的評価をしておくことも忘れてはならない．

最近，DSPを用い音声を自由に加工できる機能を備えたデジタル補聴器の研究が始まってきているが，この場合も聴覚障害者がどのような聴取特性をもっているかを徹底的に把握することが大切である．音声の特徴抽出をするということは，重要な情報を欠落してしまう可能性があり，音声を加工したためにかえって聴きづらくなる恐れがある．デジタル補聴器の設計ではとくに心理物理実験による評価が不可欠になる．

2.3　発声代行機器の設計のための心理物理的評価

何等かの原因で喉頭を摘出した無喉頭者は食道を利用して発声をしたり，人工喉頭を利用しているが，それらの方法は音質があまりにも悪いという問題があった．人間の聴覚は音声の不自然さに対してきわめて敏感である．音声の自然性を決める要因はたくさんあるが，その中でもピッチゆらぎや波形ゆらぎがとくに重要な役割を果たしていることが分かっている．このことは，物まね鳥の九官鳥音声のスペクトルはヒトとはかなり違うのに，ゆらぎが驚くほど似ていることからも容易に想像される．

図7は，我々が開発を進めている電気人工喉頭のブロック図である[9]．ここで，音源としてピッチ一定のパルス列を利用すると，人工喉頭音声はブザーのような音になってしまう．そこで，波形ゆらぎを付与するため，生の母音から音源を推定し，さらに，その高調波成分の周りにある側波を取り出した．図8は，その側波を，ピッチ一定のパルス列の高調波成分の周りに少しずつ付加していったときに自然性がどのように再現されるかを調べたものである．実験では，8個のテスト音の中から2個をランダムに選んで人工喉頭音声を作り，どちらがヒトの声により近いかを答えさせている．結果から，高調波に±18Hz程度の側波をつけると自然性が得られることが分かっている．

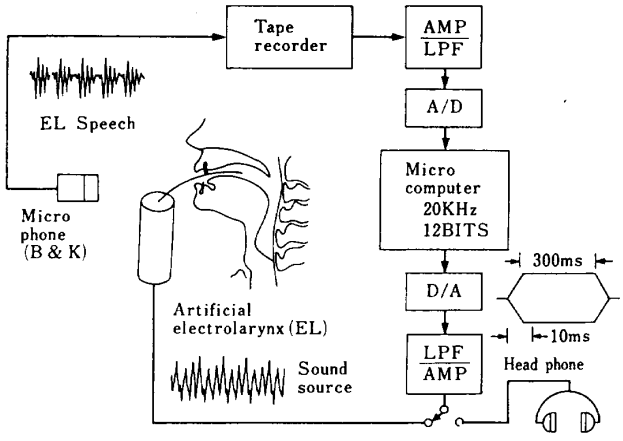


図7　電気人工喉頭の構成図

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

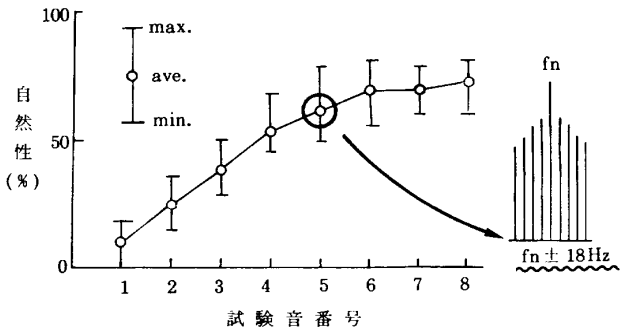


図8　人工喉頭音源の高周波成分に側波を付加した場合の自然性の増加（縦軸：自然性，横軸：側波の数）

このように，単に，音声として再現されれば良いのではなく，その音声がいかにヒトの声らしいかということが大切なのである．福祉機器を開発する上では，このようなデリケートな心理物理実験を繰り返すことが必要なのである．

2.4　盲人歩行補助器の設計のための心理物理的評価

音を利用した福祉機器の評価研究として，コウモリの反響定位機能を模擬した盲人用歩行補助について述べる．図9は，モモジロコウモリが発する超音波と同様に，1ミリ秒内で周波数が70kHzから40kHzに下降する音を発生し，それを2個の受信器で検出して時間的に50倍に引き延ばして両耳に可聴音で聴かせるものである[10]．コウモリが何故下降FM音を利用するのかは謎であったが，上昇FM音および一定周波数音を発射音として利用し，障害物からの反射音を聴取してみると，ある条件のもとでは下降FM音の方が障害物の認知に有効であることを心理物理実験に基づき明らかにしている．

図10は，左方向45度のところにある壁に対して右方向45度のところにおいた棒（障害物）がどの程度の距離で検知できるかを調べたもので，横軸を棒の直径，縦軸をその棒をやっと検知できるときの距離を表している．その結果，下降FM超音波を利用した時が他の音に比べて遠い距離でも検知しやすいことが分かる．このことからもコウモリが下降FM音を利用している理由が理解できる．このように，九官鳥とかコウモリのような特

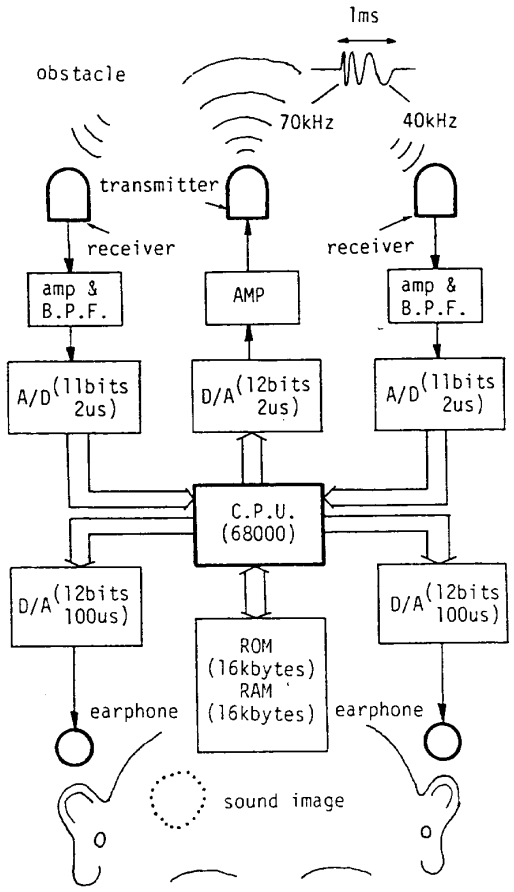


図9　モモジロコウモリの反響定位音と同様の超音波を発する盲人用歩行補助器のブロックダイアグラム

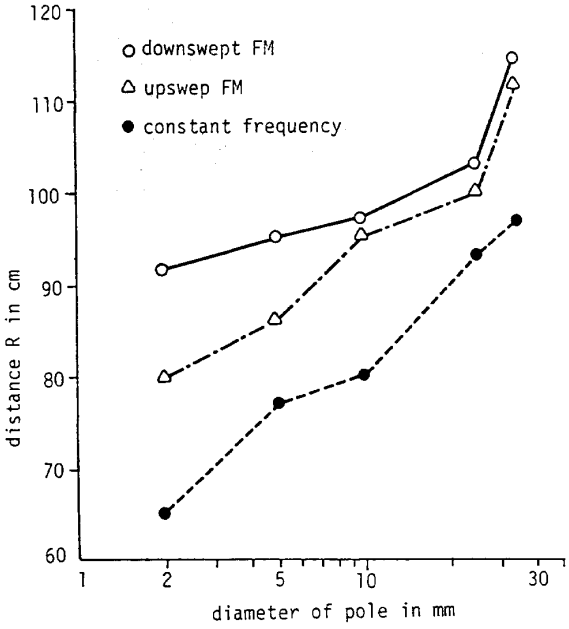


図10　左方向45度に壁があり右方向45度に障害物の棒があるときの障害物認知特性（縦軸：障害物の棒をやっと検知できるときの棒までの距離，横軸：棒の直径，下降FM音，上昇FM音，一定周波数音の比較）

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

殊な能力を備えた動物の機能をヒトに置き換えて心理物理実験で評価するのも福祉機器を開発する上で重要なアプローチといえる.

2.5 触覚のテレイグジスタンスのための心理物理的評価

最後に，触覚のテレイグジスタンスについて現在進めている研究を述べながら，人間ー機械系の設計における心理物理的評価の重要性について考察したい．テレイグジスタンスの研究は視覚の分野では盛んに行われているが，ロボットハンドの人工触覚が検出した情報をできるだけ忠実にヒトの手指へ呈示するという研究はきわめて少ない．図11は，磁気センサで検出した指関節角度に忠実に人工指が動作するマンマシン系を示したものである[11]．さらに，人工指に加わった力の大きさと方向を人工触覚で検出し，それを手袋内に納めた触覚呈示器で指先に呈示することができるようになっている．

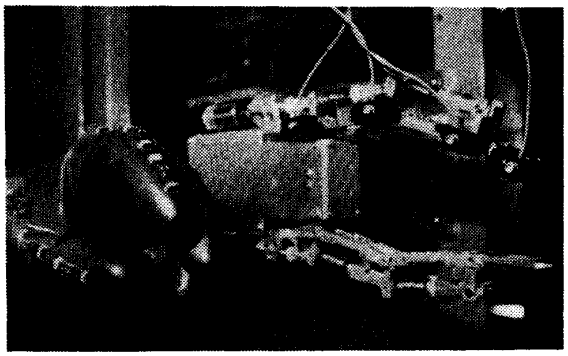


図11　磁気センサで検出した指関節角度に従って動作する多関節人工指

図12は，手袋内に挿入した小さなバルーンを介し指示指復を圧迫した場合に圧覚をどのような特性で知覚させ得るかを心理物理実験で調べたものである．縦軸は弁別閾で横軸は指示指復に作用させた圧力であるが，その関係はステーブンスのべき法則にほぼ従い，べき数も約1になることが分かる．このことから圧覚に関してはロボットハンドが得た情報をヒトの手指に正確に呈示するにはどのように情報を交換すれば良いかが分かる．圧覚だけでなく，ひずみ覚，ずれ覚，さらに材質感なども忠実に呈示し，円滑なマンマシン系を構築していくためには，心理物理的評価がますます重要になってくると考えている．

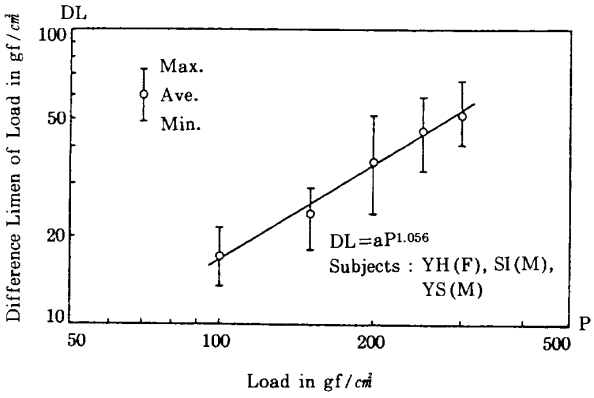


図12　手袋内のバルーンに加えた圧力（横軸）と指先の圧覚弁別閾（縦軸）の関係

3. おわりに

以上，我々の研究室で進めてきた感覚代行やヒューマンインタフェースの研究を通じて，マンマシン系を評価する上でいかに心理物理実験が重要な立場を占めているかを述べた．その他，車の乗り心地の評価，視覚障害者のためのコンピュータ利用のための技術，視覚のテレイグジスタンス，盲導犬ロボット，人工現実感技術，音声認識合成技術，車椅子の制御，FESのための感覚フィードバックなど数え切れないほどのマンマシン系があり，そのための優れた研究が行われているが，いずれも心理物理実験を抜きにしてはその評価は不可能であろう．先に述べたように，障害者の場合には失われた機能を補償するように別の感覚が発達してくるため，それを壊さないように新しい情報を付加することが大切である．そして，心理物理実験に基づいた障害者と機械とのマンマシン系を評価する研究は健常者と機械との融通性に富んだマンマシン系を構築する上で必ず役に立つものと考えられる．

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

参 考 文 献

1) 伊福部，湊，吉本：心理物理実験によるタクタイルボコーダの基礎的研究，日本音響学会誌，31 (3)，170–178 (1975)
2) 伊福部：触知ボコーダにおける最大伝達情報量，日本 ME 学会誌，17 (3)，51–58 (1979)
3) Ifukube, T. : A tactually cued vocoder, Computers in Aiding the Disabled, North Holland 197–213 (1982)
4) Ifukube, T. and Yoshimoto, C.: A sonotactile deaf-aid made of piezoelectric vibrator array, J. Acoust. Soc. Jpn, 30 (8), 461–462 (1974)
5) Ifukube, T. and White, R. L. : A speech Processor with lateral inhibition for an eight channel cochlear implant and its evaluation, IEEE Trans., BME–34 (11), 883–890 (1978)
6) Ifukube, T. : Discrimination of synthetic vowels by using tactile vocoder and a comparison to that of an eight–channel cochlear implant, IEEE Trans., BME–36 (11), 1085–1091 (1989)
7) Ifukube, T. and White, R. L.: Current distribution produced inside and outside the cochlea from a scala tympani electrode array, IEEE Trans., BME–34 (11), 876–882 (1987)
8) Ifukube, T., Hirata, Y. and Matsushima, J. : A new model of auditory prosthesis using a digital signal processor, J. Microcomputer Applications, 13, 219–227 (1990)
9) 八幡，伊福部：音声のピッチパターンを考慮した電気人工喉頭，30 (4)，309–315 (1989)
10) Ifukube, T., Sasaki, T. and Peng, C. : A blind mobility aid modeled after echolocation of bat, IEEE Trans., BME (in press)
11) 井野，泉，伊福部，木村：チップコイルを用いた指関節角度センシングと多関節人工指の遠隔操作への応用，計測自動制御学会論文誌，（印刷中）(1990)



伊福部達（いふくべ とおる） 昭和昭和46年北大修士・電子工専攻修了，同大学応用電気研究所助手，昭和52年工学博士，同研究所助教授，昭和59年米国スタンフォード大学客員助教授，平成元年同研究所教授．この間，感覚代行の研究に従事し，触知ボコーダ，音声タイプライタ，人工内耳，人工喉頭，超音波眼鏡，九官鳥音声，コウモリの反響定位，蝋管音声再生などの研究を行った．日本 ME 学会，日本音響学会，日本ロボット学会などの会員．

NII-Electronic Library Service