

マグル・フレンドリー・インタフェース設計論 ～身体性を重視した人間拡張型 UI 設計法の提唱と考察～

木村 朝子^{†1} 松室 美紀^{†1} 田村 秀行^{†2} 大槻 麻衣^{†3}

概要：電子情報技術，センシング技術の進歩により人間拡張機能（Human Augmentation）の実現が容易になり，研究が活発化，多様化している．とりわけ，コミックや SF 映画に登場するようなスーパーヒーローのような超能力を擬似的に発揮できることは夢のあるテーマであり，この範疇に属する開発も進んでいる．その種のスーパーパワーを円滑に発揮するには，紛れがなく，習熟しやすいユーザ・インタフェースの設計・実装が望まれる．そのためには，身体性を有し，利用者が過去の体験から想起しやすい UI が最も望ましいと考え，我々はその設計方法，評価方法の枠組みを提唱する．既に着手している事例を上げて，今後解決すべき問題点や挑戦すべき研究課題を考察する．

キーワード：人間拡張，ユーザ・インタフェース，メンタルモデル，アフォーダンス，認知モデル，ACT-R

1. はじめに

“Augmented Human (AH)”という言葉が最初に聞いたのは約10年前だったのだろうか.“Augmented Reality (AR)”なる用語は1990年代前半から有ったから，すぐ意味は通じた。「知力増強から身体増強に」というキャッチフレーズも印象に残っている．その後，「人間拡張 (Human Augmentation; HA)」と称する研究開発が本格化している[1][2]．「人間」が表に出てくる以上，当然 HCI (Human-Computer Interaction) 研究との関連は密であり，センサやアクチュエータ，電子情報技術の進歩により，HA が今後はますますの発展を遂げることは確実だろう．

その前提の下に，我々は HCI 研究の次世代を考えた研究構想を抱いた．本発表では，UI 設計方法論を提唱する．

AH もしくは HA の対象は広汎であるが，我々は「人間能力の拡張」の基本形として，アメコミ（米国製のコミック雑誌）や SF 映画に登場するスーパーヒーローが有している超人能力の実現を目指すことにした．時に「エスパー」「ミュータント（突然変異種）」と呼ばれる超人ヒーローのごとき振る舞いである．といっても，口から炎を噴いたり，手から強靱な蜘蛛の糸を出すのではなく，ましてや他人の記憶を消したりする訳ではない．もっとシンプルに，五感レベルの知覚受容能力を拡張し，常人が「身体能力が増強した」と感じるようなシステム開発を目指している．

HCI 的に言えば，身体性を伴う直観型インタフェースを実現し，電子的&物理的な擬似超能力体験を利用者に提供することを目標とすると言える．人間を超える超能力が発

揮できるなら，ボタン操作であろうが，キーボード操作であろうが構わないはずであるが，我々は徹底して「なるべく近い身体部位を使う UI」に拘りたい．その方が覚えやすく，学習しやすく，習熟度も上がると信じるからである．HCI 用語で換言すれば，その方がメンタルモデルを形成しやすく，アフォーダンスが内在しているからである．

実際，スーパーヒーロー達はそうしている．スーパーマンは X 線透視をする時，目を凝らす動作をし，空中遊泳中に加速する時は，右腕を後ろから前へぐりと回す．犬屋敷警官は遠くの人々の声を傍受する時，耳の傍を指でこする．といった具合に，アニメや SF 映画で描かれる超能力の発揮方法は，素人が理解しやすい形態である．今後数々の HA 機能が実現され，多様化して行くことを考えると，現時点で決め打ちした人工的かつ効率的な UI よりも，利用者にとって直観的な UI の方が体系的に整理しやすい．

当研究グループでは，これまでも直観的に利用できる道具型対話デバイス ToolDevice の研究を行ってきた[3][4]．慣れ親しんだ道具（絵筆，ピンセット，トンカチ等）のメタファを活用した対話デバイスで，形や材質からその使い方が容易に想起できるものである．別の言い方をすれば，道具自体に正しい使い方「アフォーダンス」が備わっているため，直観的な利用が可能なのである．

今まで持っていない超能力発揮となると，慣れ親しんだ用法，長年の経験はない．それでも「自分に超能力があったら…」と過去の身体経験を外挿して考えることにより，擬似超能力発揮に適した身体的動作を思い描くことはできるだろう．この外挿的発想に基づく UI 設計方法論構築が本研究の目標である．

現状，まだ方法論の入り口であり，整備された設計論にまでは至っていないが，本稿では，現在までの研究事例，考察結果を紹介する．これは，敢えて研究会発表で批判を浴び，方法論の是非の議論が巻き起こり，類した研究が生まれて来ることを望んでいるからである．

^{†1} 立命館大学 情報理工学部
College of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University
^{†2} 立命館大学 総合科学技術研究機構
Research Organization of Science and Technology,
Ritsumeikan University
^{†3} 筑波大学 システム情報系
Faculty of Engineering, Information, and Systems,
University of Tsukuba



図1 「視・聴・触・身」4つの人間拡張

2. 身体性を重視した UI 設計法とその評価法

2.1 「視・聴・触・身」4つの人間拡張

超人的能力の電子的実現は今後益々発展するであろうが、本研究での当面の研究対象は、以下の「視・聴・触・身」の4つに絞って考えている(図1)。

(a) 視覚拡張=物体内部が透視できる、あるいは屋外で障害物を透過して、向こうが見える。具体的には、Half-DR による透過表現を活用し、屋内外の多層の障害物を順次遷移、空間移動できる「千里眼透視」を実現する。

(b) 聴覚拡張=多人数の会話中や、はるか遠方にいる特定の人物の音が聴き取れる。具体的には、光レーザーマイクロホン[5]を利用して音による振動を捉え、常人が聞き取れない遠方音も含めた選択的集音を実現し、肩口に置いたパラメトリックスピーカを用いて利用者の耳元だけに届ける。

(c) 触覚拡張=人間の指先では識別できないような高精度、高解像度での触覚能力を有する。具体的には「GelSight方式」[6]を拡張し、人間の触覚分解能を超える触覚センシングモジュールを開発する。出力は、指先電気刺激、前腕部モータ刺激を組合せた触覚提示方法を採用する。

(d) 身体伸長=恰も自分の腕が伸びたかのように物を操作することができる。具体的には、投影型 AR とビデオスルー型 MR の両方式で、上肢伸張機能を実現する。伸びた手の身体所有感覚を高めるため、Pseudo Haptics による操作性向上、力覚フィードバック装置の導入も図る。

上記の各超能力は単独で使うだけでなく、2つ以上を融合して威力発揮することも前提としている。例えば「千里眼的な透視をして、遠方に見える事物の音を聴き取る」「数メートル先まで手を伸ばし、そこにある物体の精細な表面を指先で感じる」等々である。電子的 and/or 物理的に具

現化するこの(擬似)超人能力を、以下では「X²(Extra-sensory & Cross-modal Use Oriented) パワー」と呼ぶ。個々を「単感 X²フォース」、それらの UI を「X²-UI」のように表現することとした。

2.2 X²-UI デザインに関する考察

身体性のある X²-UI の着想・設計に関して、様々な思考実験と考察を行なった。以下は、その一端である。

●超能力、身体性を実感できる UI の設計と実装

山の向こうの光景が観えても、遠方の音が耳に届いても、それだけなら、人は自分が超能力者になったとは思わない。不可視/不可聴/不可触データを提示するしかるべき UI が存在し、自らの身体性を感じつつ、感覚器官に届き、適切に知覚されて初めて、自分の知覚能力が向上したと感じるだろう。それゆえ、その UI デザインは、衰えた器官を補う老眼鏡や補聴器、失った器官を補う義眼・義手・義足の UI とは異なるものであるべきだと考えられる。

●X²パワー発揮時の3つの UI モード

超人に変身し、超能力を発揮し、目的を達成後に常人に戻るまでの X²-UI は単純ではなく、次の3つに大別して着想・選択・実装すべきであると考えられる。

(1) X²モードへのスイッチ/移行

常人(マグル)から超人(エスパー)への切り替え(e.g. ピーター・パーカーからスパイダーマンに)やその逆行動には、紛れがなく、誤動作しない安定した UI が不可欠である。フル能力の発揮までに少し時間がかかる漸次変身があっても良いが、変身意志の伝達は瞬時であるべきである。

(2) 個々の X²フォース発揮時の UI

X²-UI の本体とも言うべきパートである。個々の X²フォース発揮時には、そのパワーのレベルに応じた実感が伴う必要がある。複数の X²フォースを融合して使う場合や、

単感 X² フォースでの多段階に展開する場合には、整合性・発展性のある UI 体系が必要となる。

(3) X² フォース達成後の機器操作/空間移動等の UI

例えば、腕や首が伸びて目的場所に達した後の機器操作等は、通常の UI に類したものが好ましい。ただし、自らの体躯が巨大化・微小化している場合は、スケール変換が必要となる。

●X2-UI の着想と選択

メンタルモデルの作りやすさ、多くの人々が直観的に利用できることを考えると、なるべく素人的発想の UI でありたい。その反面、超人的能力の発揮となると、センサや表示デバイス等、実現の技術的制約も大きい。この相反する要求を両立できる X2-UI のデザイン案を得るのに、以下のような手順が考えられる。

1. (a)~(d)の目的だけを述べ、一般人に直観で好ましい UI を答えさせる
2. 実現性を考慮した複数案を提示し、その中から選ばせる
3. 実装した UI を与え、試用後に好みの UI を選択させる。
4. 上記でパラメータ調整可能にし or 改良版を体験させて、再選択させる

等の過程を経て、X2-UI を向上させて行く。

2.3 マグル・フレンドリーI/F とその評価

2.3.1 マグル・フレンドリーであるべき理由

本稿の表題では、敢えて「マグル・フレンドリー」という言葉を初めて使った。「マグル (Muggle)」とは、児童文学「ハリー・ポッターシリーズ」(全 7 巻、映画は 8 作品) に登場する用語で、著者 J・K・ローリングの造語である。「非魔法族」の意味で使われているが、「魔法使い (wizard or sorcerer)」ではなく、魔法を使えない「普通の人間」のことである。あくまで、魔法使いあつてのマグルであるので、ここでも、超能力発揮を論じる場合の「普通の人間」、「超人」に対する「常人」の意味で使っている。「マグル・フレンドリー」を論じるのは、2つの理由からである。

■センサ技術の進歩により、人間が知覚できない不可視情報、不可聴領域の音を検出できるが、X2-UI を利用するのはマグルであるから、可視域/可聴域へのマッピングが必須となる。即ち、スーパーマンのようにクリプトン星から地球に来た訳でも、スパイダーマンのように蜘蛛にさされて DNA が変化して超能力を得た訳ではないから、アイアンマンやバットマンのように機材や財力に頼らないと超能力者並みには戦えない。即ち、入力系(環境センシング及び識別能力)は超人的で、表示系は常人対応でなければならない、この意味で、X2-UI のユーザ適用は特別な配慮が必要であり、「マグル・フレンドリーさ」を要求される。

■着想は SF 映画的であっても、上記のマグル対応をした人間拡張システムは、完成度が上がり、利用頻度が増え、習熟すればするほど、通常の電子機器の UI と変わらなくなると予想される。それゆえ、X² パワー発揮のメンタルモ

デルの作りやすさ、紛れのなさは、Continuity, Integrity, Uniformity で評価できると考える。また X2-UI の習熟度、学習効果の評価は、普通の正誤率、応答速度、実行時間等で測れるだろう。よく知られた「Nielsen のユーザビリティ 10 原則」[7]も参考になる。

2.3.2 X2-UI 評価への認知科学的アプローチ

さらに、身体的動作の UI の客観的評価を進めるため、我々は認知科学の研究成果を活用した評価方法の積極的導入を計画している。従来、人間の認知過程の解明をめざして構築されてきた理論が、超人的身体動作の UI 評価に適用できるか試すことも、我々の研究目的である。

「認知アーキテクチャ」とは、人間の認知の統合的な理論を計算機で実行可能な形式にしたものである[8]。例えば、知覚のための目や耳、運動のための手、人間の認知の構造や脳のメカニズム、それらの統合に関する理論等が含まれている[9]。これは、必要な知識を与えることにより、様々な課題を人間のように遂行可能となる汎用人工知能の一種とされている。

特定の課題を実行する際の人間の認知過程を計算機上に実装し、シミュレーションを行うことは「認知モデリング」と呼ばれている。この認知モデリングを用いることにより、下記が可能とされている。

◆課題中の認知過程を直接的に観察：シミュレーションのログより、課題遂行の停滞時に認知的に何が生じているかを観察可能

◆課題遂行への特定の認知要因のみの影響を検討：人間は個人差が大きく、複数の認知要因が同時に変化するが、認知モデルでは認知要因の統制が可能

◆統制された状況で課題環境の変化の影響を検討：完全に同じ認知能力を持った認知モデルを用いて、異なる UI の操作テストが可能

以上の検討から、図 2 の枠組みで身体性の動作を対象とすることは可能と考え、第 3 章の課題を第 4 章のような方法でシミュレートし、評価することを目指している。

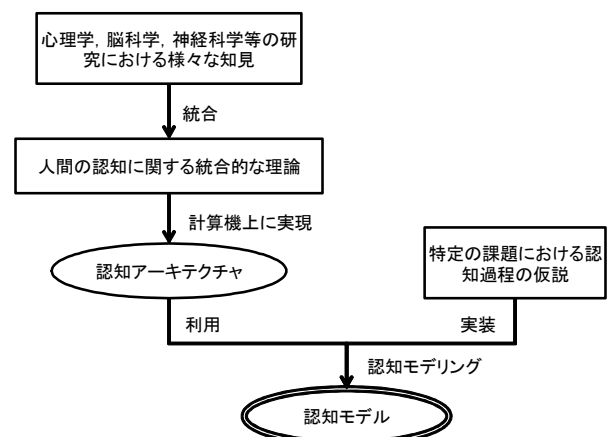


図 2 認知アーキテクチャと認知モデルの関係

3. 事例としての X² パワーの実装と試用

「視・聴・触・触」4つの人間拡張機能の実現は並行して進めているが、ここでは身体性のある X2-UI の実施事例として、「千里眼透視機能」と「上肢伸張機能」だけを取り上げる。以下では、それぞれ本研究以前に開発されたシステムを紹介し、これらをどのように X2-UI 化しているかに関して述べる。

3.1 身体伸張：ろくろ腕と付随するろくろ首

3.1.1 投影型身体伸張インタフェース ExtendedHand

視覚的に自らの腕が伸びたように感じたり、他人に伸びた腕を視認させることが出来るシステムは複数提案されている[10][11]。指だけが伸びたり、腕や指の本数が増えるといった身体拡張も提案されている[12][13]。とりわけ、大阪大学・佐藤宏介研究室で開発された ExtendedHand は、長年の研究で数々の改良が加えられ、完成度が高い。最近、タブレット端末で操作できるもの[14]が公開されているので、これを入手して本研究を深化させる手掛かりとした。

ExtendedHand では、プロジェクタから投影された手のモデルを、自分の手の延長として操作するシステムである。タブレット端末利用版は、以下のように、端末画面を指で操作することにより、ビデオ投影された手を伸ばしたり、動かしたりできる(図3)。

【移動】片手の五本指を端末画面に触れたまま前後移動することで、投影された腕を前に伸ばす／後ろに戻すことができる。左右移動することで、腕も左右に平行移動する。

【回転】同様に画面に触れたまま、左か右に回す動作で、投影された腕が同期して回転する。

【開く／閉じる】同様にタブレット画面に触れたまま指で掴む動作をすることで、投影された手指が閉じる、その逆の動作で手指が開く。

【クリック】同様に五本指が端末画面に触れた状態で、指1本を上げ、再度触れることで、クリック操作ができる。

【ポインティング】端末画面上で人差し指だけを移動させることで、投影された指で目標物を指し示すことができる。

ExtendedHand の利用に関しては、様々な応用が報告されている。例えば、伸ばした手で部屋の照明や家電製品を

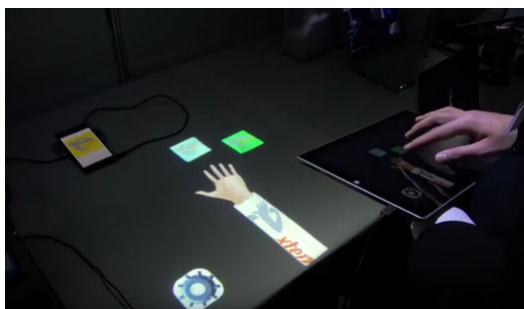


図3 タブレット端末を介した ExtendedHand の操作

クリック動作することで、複数のリモコンを使わず電源 ON/OFF を遠隔操作できる。また、開く／閉じる動作と移動動作の組み合わせで、掃除ロボットの位置を制御可能となる。他人とのコミュニケーションでは、手を伸ばして作業希望場所を指示したり、会議中に座したまま、自分の手が届かない種類を指し示すことができる。

3.1.2 MR 空間利用型上肢&頸部伸張システムへの展開

上記の ExtendedHand は手指の動作を投影された腕や手に写像することで、既に身体的 UI を実現していると言える。その反面、自らの腕を動かすという身体感覚は捨象している。また、ビデオプロジェクタを利用する投影型 AR が前提となっているので、壁面・卓上面・床面への 2D 映像の投影という限界がある(3D-CG での描画で、腕や手の見た目のリアルさは増しているが…)。

我々は ExtendedHand を手本とするものの、X2-UI として、3次元空間で腕を伸ばす感覚を重視し、ビデオスルー型 HMD を装着し、複合現実空間で目標物を指示・操作する上肢伸張システムを目指すことにした(図4)。また、試作を進める内に、腕をかなり伸ばした先で目標物を視認するには、首も伸ばして対象物に接近して詳しく眺める必要性を感じ、上肢拡張に付随して頸部伸張機能ももたせることにした。分かりやすいよう、前者を「MR ろくろ腕」、後者を「MR ろくろ首」と俗称することにした。

既に基本機能を実装した上で、操作感の評価実験。体験者の嗜好の分析を行なっている。以下はその概略で、詳細の報告は別の発表機会に譲る。

■体験者の身体性保持感覚を確認するため、腕の CG 描画の影響を分析した。腕の幾何形状モデルの陰影表示。体験者の腕表面のテクスチャのマッピング、カメラから取得した体験者の腕を映像的に引き伸ばした場合の3種類で比較実験を行なった結果、3番目が前2者よりも、体験者の上肢伸長感覚が強かった。

■触覚刺激の付加が身体性感覚を増すと考え、実物体を押す時の反力と弾力のある実物体で腕が引っ張られる感覚で、触覚刺激の比較実験を行った。その結果、腕が引っ張られる感覚を提示した場合の方が感覚は強かった。

■腕の伸び率を変化させた実験も行なった。5倍(2m)、10倍(4m)、15倍(6m)、20倍(8m)、25倍(10m)、30倍



図4 MR 空間利用型の「ろくろ腕」(第3者視点)

(12m)の6通りの伸び率を採用した(括弧内は仮想空間内での腕の長さ)。まだ初期実験に過ぎないが、体験者の感想では、伸び率20倍が最も上肢伸長感覚が強い。

■頸部伸張の「MR ろくろ首」は、その始動に3パターンを用意した。(i)腕を伸ばすと同時に首も伸長する、(ii)腕と手が先に移動し、後で首が伸びて頭が手を追いかける、(iii)目標が見えるまで先に頸部伸長して、後で腕を伸ばして指し示す、の3モードを実装済みである。いずれの場合も、体験者からは「遠いオブジェクトが見づらい問題を解決された」との評価を得ているは、3モードの使いやすさの比較評価には未着手である。

3.2 千里眼透視とアイ・ジェスチャ操作

3.2.1 多層透視型映像体験システムの概要

現実物体を視覚的に隠蔽・消去する隠消現実感(DR)の一形態である半隠消表示(Half-DR)の応用例として考案したシステムである[15]。以下の2つのモードがある。

(A)多層シースルー・モード：展望台等にある望遠鏡(双眼鏡)をメタファとし、山や建物の向こう側を電子的に拡大透視できる。体験者位置、視点位置が共に固定されていて、視線方向に存在する対象の層を透明化し、奥に存在する肉眼では観測できない不可視層を次々と透視し、同時に望遠観測を可能にする定点透視である(図5(a))。

(B)ムーブスルー・モード：上記の拡張形として、体験者に擬似的移動感覚を与え、不可視層の先に観測点を移す。これによって、パースの異なる光景を順次視認できる。WWWで利用できるGoogle Street Viewの基本形が道路に沿った移動しかできないのに対して、本モードは建物を突き抜けて移動する体験を可能にする(図5(b)(c))。

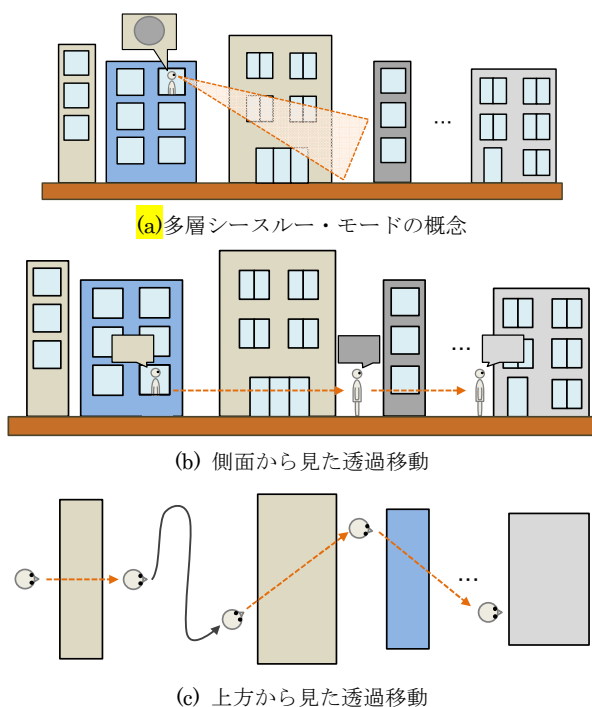


図5 シースルー・モードとムーブスルー・モード

両モードの基本機能としては、以下がある。

- (A-1) 手前の層の一部(透視窓)を透かし奥の層を表示
- (A-2) さらに奥の層への前進・後退と初期位置への復帰
- (A-3) 透視窓の拡大・縮小と窓形状の変形(デフォルトは円形で、楕円形等への変形可能とする)(図6)
- (AB-4) 観察視野の回転移動(パン&チルトでの見回し)
- (AB-5) 観察視野の拡大・縮小(ズームイン/アウト)
- (AB-6) 事前観測映像とライブ映像の切り替え
- (AB-7) A, B 両モード間での切り替え

Bモードでは、次の独自の仕様となっている。

- (B-1) 遮蔽物の先への透過移動(視野は全画面表示)
- (B-2) 上記移動後に、その層内での観察視点移動
- (B-3) 上記2つの後退移動(逆回し)と初期位置復帰

透視対象となる光景は、実世界を事前に観測した静止画像から着手したが、収録済みの動画(ビデオ映像)の結合を終え、ライブ映像も取り扱えるように拡張中である。

3.2.2 アイ・ジェスチャ操作の設計と実装

上記システムは「千里眼透視」という超人的能力を電子的に実現しているものの、まずは透視機能の設計・実装を優先し、身体的動作のUIまでは考慮せず、キーボードやHMDに付着したボタンで動作指示していた。

次なる目標として、上記基本機能の操作I/Fを、すべて身体性を伴うX2-UIに置き換えて実行できることを目指している。その第一歩として、以下のような1操作だけのUI設計と実装、試験的運用を行なった。

透視に関する身体的動作としては、「1点を注視する」「瞬きする」等の眼球や顔に関わる動作を選び、これらを「アイ・ジェスチャ」と総称することにした。

アイ・ジェスチャを操作コマンドとして設計・実装する上で、次の2点を重視した。

- (1) 入力動作をなるべく単純なものにする：目や顔の動作が複雑であると、覚えるのにも、習熟するのにも時間がかかる、疲れるなどの問題が発生するからである。
- (2) 誤認識が起りにくい入力方法を設計する：人は普段から無意識の内に瞬きを行うため、1回の瞬きで反応したのでは、誤ってシステムが反応してしまう恐れがある。このような誤認識を防ぐために、普段の生活では余り用いない目の動きを入力方法として選択する必要がある。

この2つの条件を満たすアイ・ジェスチャの初期セット



図6 多層透視型映像体験システムの画面例

として、表 1 に示す 4 種類の動作を選んだ。

今回はディスプレイ上の映像を眺めながら透視体験をするよりも、没入感を高める目的と、上記アイ・ジェスチャを検出する機構を搭載している HMD として、FOVE 0 を用いた (図 7)。

初期実験としては、同じ建物を透過して次層の映像を観ることに、4 種のアイ・ジェスチャ・コマンドを同等に扱い、複数の体験者に利用してもらった。検討結果として、透視を行う際の入力動作を行う時間が短く、かつ人によって得意不得意が別れない要素が必要であることを確認した。

常人から超人モードへの切り替え、移動モードの切り替え、前進・後退動作にもアイ・ジェスチャを導入したいので、今後、その種類を増やして行きたい。

4. ACT-R による X² パワーの認知モデリング

4.1 認知アーキテクチャ ACT-R の概要と拡張

本研究では、認知モデリングを行なうのに、最も著名な ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational) [16] を採用することにした。ACT-R は、カーネギーメロン大学の John R. Anderson を中心に開発された認知アーキテクチャの一種で、700 以上の科学的業績を残している [17][18]。

ACT-R は図 8 に示すように、特定の機能を持つ複数のモジュールから成る。主に、目や手等の知覚・運動に関するモジュール、手続き的記憶、宣言的記憶からなる記憶モジュール、目標の保持や表象の生成に関連するモジュール等がある。標準で提供されるモジュールで不足している場合は、ユーザ側で追加モジュールを開発して拡張する。

表.1 アイ・ジェスチャの種類

【3 秒間注視】	建物を 3 秒間注視することで、透視を実行
【2 回連続瞬き】	建物を見て 2 回連続で瞬きを行うことで、透視を実行
【片目閉じ】	建物を見て片目を閉じている間、透視を実行
【ウインク】	建物を見てウインクを行うことで、透視を実行

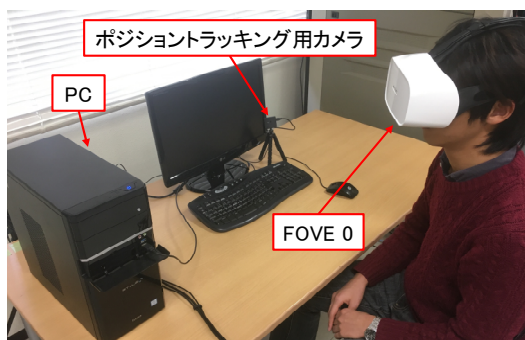


図 7 アイ・ジェスチャを検出できる実験システム機器構成

ACT-R を用いた認知モデル (ACT-R モデル) の構築には、「宣言的記憶モジュールへの宣言的知識の実装」と「手続き的記憶モジュールへの手続き的知識の実装」を行なう。前者は「a is b」「e has f」等の命題形式で表現する。後者は、(if ~, then ~) のプロダクションルールで記述する。

課題遂行は、大きく以下の流れで行われる。

- (i) 知覚モジュールを用い、環境から必要な情報を取得する。
- (ii) 必要なら、宣言的記憶モジュールから課題関連の知識を想起する。
- (iii) 関連情報や知識、現在の目標と、各手続き的知識の if 節の内容のパターン照合を行い、一致したプロダクションルールが発火し、then 節の内容が実行される。

状況変化に基づき、上記の then 節を順次実行することにより、運動モジュールを通じた課題環境の操作、新しい情報の獲得、新しい知識の想起等が行われる。

4.2 X²-UI への試験的適用

4.2.1 プロダクションルールのラフデザイン

個々の課題解決に ACT-R を利用するには、ユーザ側で図 8 の黄色の部分を用意し、試行錯誤を繰り返して、認知モデルの精度・性能を向上させて行くことになる。

第 3 章の課題の達成方法を第 1 次検討したところ、「手を延ばす」「瞬きで次の層を透視する」という操作を身体的 UI で実行するのに必要と考えられるプロダクションルールをラフデザインしたが、その一例を紹介する。

【腕を伸ばす行為のルール】

- ・腕を伸ばし、目標物に触れることを課題とする。
- 【PR11】 IF 視界の情報が更新された, THEN 目標物を見つける
- 【PR12】 IF 目標物を見つけた, THEN 目標物までの距離と角度を算出する
- 【PR13】 IF 目標物は手が届かない位置にある, THEN 目標物に向けて必要なだけ腕を伸張する
- 【PR14】 IF 目標物は手が届く位置にある, THEN 目標物に掌に触れる

【瞬きで次の層を透視するルール】

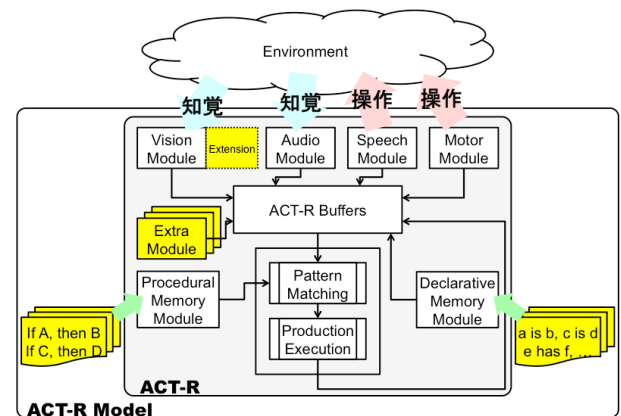


図 8 ACT-R の基本構成とユーザ準備部分 (黄色)

・ 所望の光景に達するまで透視することを課題とする。

[PR21] IF 次の層が表示された, THEN この層で満足か判断する

[PR22] IF 目的とする透視は達成した, THEN 課題終了

[PR23] IF この層では満足できない, THEN 瞬きを2回して, 次の層を透視表示する

上記は簡略化して述べたが, 環境・状況に応じて, 多数の具体的プロダクションルールを開発して行くことになる。

4.2.2 追加モジュールの必要性：瞬き等

ACT-Rには既に複数のモジュールやその機能が実装されているが, それであらゆる人間の動作や思考がシミュレート出来る訳ではない。例えば, 目に関わる認知機能として, 「見る」能力だけが重視されているので, 「瞼」の概念がなく, 「瞬き」という行為が実装できない。このため, 我々の研究では, まず「vision module」を拡張し「瞬き」を可能とする開発に着手している。

また ACT-R では, 単純に「腕を伸ばす」「物に触れる」ことはできても, 通常腕を5倍, 10倍に伸ばすことは想定していない。そうした超人能力までを考えると, 自身の腕をどの程度動かすとどの程度腕が伸びるかという対応を学習する必要がある。このような身体運動の学習は ACT-R には実装されていないため, 学習を担うモジュールの追加実装を計画している。

さらに, 他の身体機能拡張の認知モデリングに関しても既存モジュールの改良や追加が必要となってくる。また, X² パワーを使いこなす過程を観察するためには, 身体運動の調整機能も実装しなければならない。

4.2.3 認知モデルの実行と UI 評価

必要なモジュールが揃えば, 認知モデルを作成する段階に進むことができる。多数の実験参加者に X²-UI を使用してもらい, その体験者の行動に基づき, 認知モデルを構築する。試行錯誤を経て認知モデルが安定したなら, そのモデルを「基本モデル」とすることで, ユーザの個人差の影響や, 設定の変更された UI の評価を行うことができる。

例えば, 腕を伸ばす場合では, 上記の [PR12] には, 距離の算出が含まれている。ここで, 算出の正確さをパラメータとして, シミュレーションを行う。その結果, 距離算出能力の個人差により, 目標物に触れるまでの時間や, 腕の伸張回数がどのように変化するかを知ることができる。

また, 透視に関しては, アイ・ジェスチャの種類を変更し, 操作方法の評価を行うことができる。同一の認知モデルに, 各アイ・ジェスチャを操作方法とした UI を使用させ, 最も素早く課題が達成でき, エラーの少ない操作方法を同定する。また, この評価には実際の参加者でデータを取得していない操作方法も含めることができる。

5. X²-UI の着想予備実験結果 & 試作の考察

本章では, X²-UI の着想のプロセスを一部試行した結果

と, 身体性のある X²-UI の実施事例である, 「上肢伸張機能」と「千里眼透視機能」の実装を通して得られた知見について考察する。

5.1 X²-UI の着想：ヒアリングでは個人差大

まず, 2.2 で述べた「X²-UI の着想」のプロセスを5名に試行した。具体的には, 「あなたが超人能力を持ったとして, どのようなアクションでその能力を利用したいですか?」と質問し, 回答させた。この際, 複数回答可とした回答する超人能力としては, (I) 遠くのを指定 (ポインティング) したり動かしたりする能力, (II) 千里眼の2種類とした。複数の回答の中で, 類似した回答を整理した結果を以下に示す。

(I) 遠くのを指定し, 動かす機能の入力操作

(I-1) 3次元空間中の物体を指で指示し, 指を動かすことで動かす

(I-2) 手を伸ばすと (腕がのびて) 指定し, 手で対象となるものをもって動かす

(I-3) 対象となるものの近くにいる他人を操る (憑依する) ことで, 指定したり動かしたりする

(I-4) 対象となるものを注視する / 目を凝らすことで指定し, 動くように念じることで動かす

(I-5) 自分が瞬間移動して, 移動後に指で指定する

(II) 千里眼透視機能の入力操作

(II-1) 透過したい方向を注視すると次々と前の実物体が透明になる

(II-2) スマホ画面を拡大する要領で, 指を広げるジェスチャをすると (II-1) と同様透明になる (現状の機器への入力のメタファ)

(II-3) 瞬きや, 目を強く閉じるなどのアクション

(II-4) 念じる

(II-5) 手で双眼鏡の形を作って, 覗き込む

(II-6) 目を閉じると幽体離脱して, 自分の意識だけ俯瞰視点に切り替わる

個人差はかなり見られたものの, 上記の回答の傾向を分析してみると, 人が直感で答える X²-UI には以下のようなパターンが見られ, 自らの経験の延長線上で X²-UI を回答している様子が伺われた。

- ・ 自分の身体能力が拡張したというメタファを入力方法として適用した方法
- ・ 既存の機器操作を導入した方法
- ・ 実世界の道具のメタファを導入した方法
- ・ 念力やテレポーテーションといった, 書籍やテレビ, 映画などに出てくる超能力者のアクションからイメージされる方法

5.2 HMD 利用の空間型腕伸張に関して

空間型腕伸張機能を試作する中で, 伸張させた仮想の腕が自身の手であるように感じるということが, 操作するうえで非常に重要であると感じた。3.1.1 で述べた

EtendedHand の開発プロセスでの知見を開発者にインタビューしたところ、EtendedHand でも同様に、仮想の手の表現にリアリティを持たせることが、操作を円滑にする上で非常に重要であったとの回答であった。また、仮想の腕を伸ばす際の伸び率や触力覚感についても、操作性や操作感を大きく変える要因となっており、検討が必要である。

5.3 ろくろ首の付随に関して

腕の伸張という目的に対しては、多くの人が口をそろえて手を前に突き出す動作を入力と答えたが、ろくろ首に関しては、現実の首はほとんど伸びないこともあり、振りかぶって首を前に傾けるや一旦首を2回傾けてから突き出すといった2段階操作など、様々な入力操作が提案された。

また、腕伸張とろくろ首の動きに関して、同期させるか／させないか、同期させる場合はどう同期させるかについても検討する必要がある。今回試した中では、完全に同期して動いてしまうと自分がコントロールしている感覚がなくなり、逆にバラバラに動かすのも難しいことがわかった。

このように複数の機能を同時に発動する場合は、それぞれの連携についても検討する必要があると感じられた。

5.4 アイ・ジェスチャの種類増加の難しさ

5.1の(II)でも述べたように、千里眼透視機能からイメージする入力操作として、目に関わる操作が多く挙げられた。今回、試作した千里眼透視への入力には、単純で誤操作の少ないアイ・ジェスチャとして、目を閉じる／開くタイミングを変えた4種類を採用したが、そもそもアイ・ジェスチャの種類はそれほど多くなく、今回採用したジェスチャに視線方向の要素を加えた程度である。今回は建物を透過する機能だけにジェスチャを割り振ったが、3.2.1で述べた他の機能にもジェスチャを割り振るとなると、その使い分けや操作がかなり難しくなることが容易に想像できる。

目の動きだけでなく、目の周りを触るなど他のアクションとの組み合わせなど、検討する必要性を感じた。

6. むすび

「人間拡張」なる研究テーマが活性化する中で、筆者等の研究グループで推進中の研究構想を述べ、電子情報技術の進歩によって実現できるであろう／実現したい人間拡張機能とそのユーザ・インタフェース設計法を提案した。

アメコミに登場するスーパーヒーローのようなスーパーパワーの発揮という、ややもすると学術研究と思われない視点を採用した。これは、その方が（まだ実現方法の専門知識が乏しい）学部学生や一般人がイメージしやすいからであり、彼らが直観的なUIの着想を得やすく、実現したUIにも親しみやすいと考えたからである。

また、敢えて研究構想から初期の実装を終えたばかりの現状を報告したのは、真摯な批判と建設的な助言を受けたいのと、本研究を超えてみせてようという類似研究が生まれてくることを望んだためである。

謝辞 EtendedHand の提供とその開発過程での工夫を教示して下さった大阪大学・佐藤宏介教授、共同研究者として、本研究の構想実現に参画して下さる電気通信大学・梶本裕之教授、立命館大学・西浦敬信教授、柴田史久教授、X2-UIの実装・実験を担当した大学院生諸君（孫洪、内村裕也、杉崎公亮）に感謝します。

参考文献

- [1] Augmented Human International Conference (2010~)
- [2] 特集「スポーツと人間拡張工学」, VR学会論文誌, Vol. 22 No. 4 (2017)
- [3] 木村朝子, 上坂晃雅, 柴田史久, 田村秀行: 空間型作業での選択・移動操作に適した道具型デバイスの機能設計と評価, 情処論, Vol. 51, No. 2, pp. 314 - 323 (2010)
- [4] R. Arisandi, M. Otsuki, A. Kimura, F. Shibata, and H. Tamura: Virtual Handcrafting: Building virtual wood models using ToolDevice, Proc. of the IEEE, Vol. 102, No.2, pp. 185 - 195 (2014)
- [5] 水野智之, 福森隆寛, 中山雅人, 西浦敬信: 光マイクロホンを用いた深層ニューラルネットワークに基づく騒音下音声復元, 信学技報, EA2016-84 (2017)
- [6] W. Yuan, S. Dong, and E.H. Adelson: GelSight: High-Resolution Robot Tactile Sensors for Estimating Geometry and Force, *Sensors*, Vol17, No.12, 2762 (2017)
- [7] <https://website-usability.info/2009/09/>
- [8] A. Newell: *Unified Theories of Cognition*, Harvard University Press (1994).
- [9] M. D. Byrne: Cognitive architecture, in *The Human-Computer Interaction Handbook*, CRC Press, pp. 110 - 130 (2007).
- [10] 岡原浩平, 小川修平, 新明拓也, 岩井大輔, 佐藤宏介: 身体拡張型インタフェースのための前腕の投影表現に関する基礎検討, VR学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 349 - 355 (2014)
- [11] K. Kilteni, J. M. Normand, M. V. Sanchez-Vives, and M. Slater: Extending body space in immersive virtual reality: A very long arm illusion, *PLoS ONE*, 7.7, pp. 1 - 15 (2012)
- [12] 小川奈美, 他: えくす手: 変調バーチャルハンドへの即応的な身体所有感の生起による身体拡張システム, インタラクシオン2016, pp. 1022 - 1027 (2016)
- [13] 佐々木智也, フェルナンド チャリス, 南澤孝太, 北崎充晃, 稲見昌彦: 複数の独立動作する腕による拡張身体部位の研究, 第22回日本VR学会大会論文集, 14E-01 (2017)
- [14] 上田雄太, 他: タブレット駆動型身体拡張インタフェース～スタンドアローン型ExtendedHand～, インタラクシオン2016, pp. 1004 - 1009 (2016)
- [15] 石橋朋果, 杉崎公亮, 和田充裕, 田村秀行, 木村朝子, 柴田史久: 多層透視型映像体験システムの再設計とユーザインタフェースの検討, 情処全大, 3X-09, pp. 4-93 - 4-94 (2018)
- [16] J. R. Anderson: *How Can the Human Mind Occur in the Physical Universe?*, Oxford University Press (2009).
- [17] F. E. Ritter, G. D. Baxter. and E. F. Churchill: *Foundations for Designing User-centered Systems*, London: Springer (2014).
- [18] S. Ritter, J. R. Anderson, K. R. Koedinger, and A. Corbett: Cognitive Tutor: Applied research in mathematics education, *Psycho. Bulletin & Review*, Vol. 14, No. 2, pp. 249 - 255 (2007).