

Squama: プログラマブルな建築のための構成要素

暦本 純一*

概要. 未来の建築空間は、環境の変化や利用者の好み／必要性に応じてその物理的な特性を動的に変化させるようになるだろうというビジョン、「プログラマブル建築」を提案し、その構成要素として、部分的に透明度を制御できるプログラマブルな壁面あるいは窓システム、Squama について報告する。このシステムでは、従来は矛盾する要求だったプライバシーと開放性の両立させることができる。デプスセンサーによる居住者の視点位置認識により、眺望をたもちながらも景観の中で見たくないものだけを居住者の視点に基づいて選択的にマスクしたり、オフィスなどで外部者に見せたくないものなどを選択的に隠すことができる(実世界モザイク)。また、日照と居住性を両立させることが可能になる。部屋の中で直射日光が当たってほしくないところを指定すると、その領域が常に影になるように、太陽の方角に基づいて窓の一部分が自動的に不透明になる(プログラマブルな影)。Squama は建築環境に置かれたインタラクティブディスプレイとして用いることも可能であるが、居住空間を構成する面がプログラマブルになることで、環境や利用者の行動に対応した動的な居住性の向上を計ること、つまり現実を調停することを主な目的としている。本論文では従来のサーフェスコンピューティング研究と、プログラマブル建築や調停可能現実 (Mediated Reality) との関係についても議論する。

1 はじめに

従来の建築物、たとえばビルや家屋は、もともと外部と内部を隔て、外部環境の変化(温度、風、騒音、外敵など)から屋内を守るためことを目的としていた。そのため、物理的な建築物は頑強であるが静的であり一度建築されるとその構造を変化させることは通常ない。窓、ブラインド、ドア、障子、移動隔壁などによって居住環境の仕切りを変化させたり外部からの採光性を変化させることは可能だが、多くの場合それは人間が手作業で行わなければならず、居住者の要求の変化や外部の変化する要因に対して動的に対応することはできなかった。

一方、コンピュータソフトウェアは再構成可能であり、要因に対して変化することができる。プログラミングによって動的に変化する要求や環境に適応しながら変化させることができる。生命体も環境に対して動的に適応する。たとえばカメレオンの皮膚は単に外界との境界であるだけでなく、周辺の質感によってその色調を変化させることができる。われわれの皮膚も太陽光線によって徐々にタンニンが増すなどの適合機能を持っている。このような環境に対する適応性や動的にプログラミング可能な機能を建築物に取り入れようというのが、本研究の目標である「プログラマブルな建築」[12]である。

このような発想は建築に限定されず、近年、Programmable Matter[6]、Claytronics[4]、Organic User Interfaces[7]、Programmable Reality[5]、Radical

Atoms[8]、などさまざまな呼称で研究が開始されている。その多くは、動的に変化するモジュールや、(現実存在する、あるいは想像上の)可塑性のある物質を構成要素とし、目的に応じて物理的な構造や特性を変化させる物質、およびその応用を探求している。本研究では、建築の構成要素としての動的性に着目し、そのような構成要素によって現実空間が調停されることを探求する。

建築物は柱、壁、窓、天井、床などのさまざまな構成要素によって成り立っている。それらをプログラマブルにする最初の試みとして、本研究では窓と壁に着目する。壁は主に空間を遮蔽し、窓は遮蔽しながらも視覚的には透過性を保っている。壁は外部の光を遮断するが、窓は眺望や採光の為に用いられている。この二つの機能を融合した新しい建築構成要素を提案する。

具体的には、*Squama*¹ と呼ぶ、モジュラーに透明度を制御可能なプログラマブルな壁面／窓について報告する。Squama は格子状に配置された“phyg-cell”と名付けた液晶モジュールから構成されており、それぞれのモジュールの透明度が独立して制御できる。すべてが透明な場合は通常の窓のようであり、全てが不透明であれば壁に近くなる。さらに部分的に透明度を変化させることで、影の制御や、プライバシーと開放性の両立など、現実の環境を調停するためにもちいることができ、固定的な窓や壁では達成できない応用が可能となる。

Copyright is held by the author(s).

* Jun Rekimoto, 東京大学大学院情報学環、ソニーコンピュータサイエンス研究所

¹ Squama はラテン語で「鱗」を意味する。



図 1. Squama: モジュラーに透明度を制御できるプログラマブル建築のための窓/壁. “phygcell” と呼ぶ矩形単位で光の透過性を変化させることができる.

2 Squama: モジュラーな透明度の制御による建築要素

図 1 に Squama の外観を示す。格子状に配置された“phygcell”と呼ぶ液晶モジュールによって構成されている。現状のシステムは 10cm 角の透明度を電圧によって制御できる液晶モジュールを 18×8 個配置している。

2.1 透過性の制御

透過性を部分的に制御するために、調光液晶シート (日本板硝子社の UMU グラス [2]) を $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ に切り出したものを利用している。この液晶シートは、透明なポリマーフィルムの中に液晶カプセル

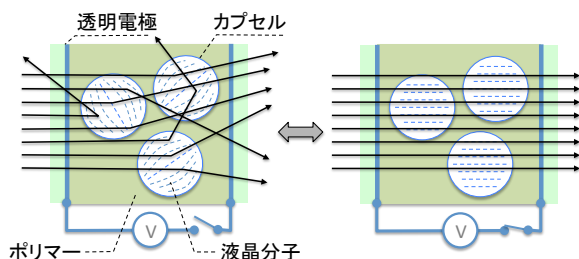


図 2. 透明度制御の原理: (左: 電圧が印加されていない状態、右: 電圧が印加された状態)

セルを封入し、2枚の透明電極膜で挟んだものである。通常の状態では、フィルム内の液晶カプセル内の液晶分子の方向がランダムになっていて、光の透過性は 6% 程度である。見た目には磨りガラスのように見える。一方、表面の透明電極を介して数十ボルトの電圧を面の表裏に印加すると、液晶分子の方向が一方向に揃い、光の透過性が 86% に上昇する (図 2)。通常の液晶ディスプレイが偏光角の制御と偏光フィルターの組み合わせで透過性を制御しているのと比較してより広範囲で透過性の制御が可能である。不透明から透明に変化する時間は $1/100$ 秒程度である。

このモジュールを、現状のシステムでは透明の亚克力板の上に 18×8 の格子状に配置して、窓として用いている。

各モジュールに独立して電圧を印加するために、マイクロコントローラ Arduino Mega と高電圧発生回路、フォトトライアックを組み合わせた専用の制御回路を実装した。システム全体は USB 経由でホストコンピュータに接続されている。ホストコンピュータ上では、各 phygcell を制御するためのプロトコルを提供するための制御サーバー稼働している。以下で説明する実世界マスキングやプログラマブルな影などの応用例は、このサーバーに phygcell 制御信号を送るクライアントプログラムとして実現されている。

3 利用形態

Squama は解像度の荒い平面ディスプレイと考えることもできるが、主な目的は通過する光を部分的に制御することで居住空間に変化をもたらすことである。以下で、その利用形態について説明する。

3.1 実世界モザイク

窓からの景観とプライバシーの確保は両立がむずかしい場合がある。たとえば都市部でビルやマンションが密集している地域では窓をカーテンで覆うなどしてプライバシー確保のために景観を犠牲にしなければならない。オフィスでガラスのパーティションなどで開放的な空間を構築しても、不要なアイコンタクトを避けるためにブラインドを下ろしてしまったりする。

景観の調整も通常の窓では達成が難しい。たとえば窓から見える景色のうち、景観として好ましいもの (樹木や空) は見たいが、好ましくないもの (近くのビルや看板) は見たくないといった要求があっても、それを達成するように部分的にカーテンを取り付けたりすることは困難である。居住者が屋内で移動した場合には、窓の隠すべき場所も変化するので、それに追従する必要があるが、通常それを手作業で行うことは現実的ではない。

このように、開放性の確保 (視界の透過性) とプライバシーの確保 (視界の遮断) は矛盾する要求で

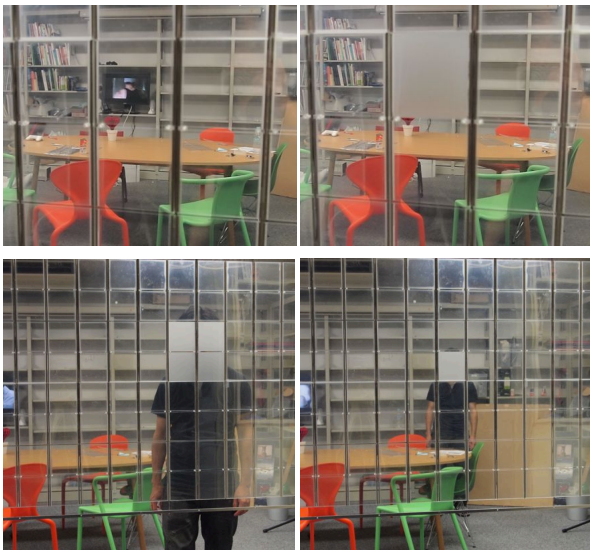


図 3. 実世界モザイク: Squama を通過してみる物体の視認性を制御し、開放性とプライバシーを両立させる。(上):特定の物体が見えなくなるようにする (下):人間の位置を認識し不要なアイコンタクトを遮断する

ある。Squama では窓の表面の部分的な透明度の変化をコントロールすることでこの問題を調停する。ちょうど写真の一部をぼかしたりモザイクを掛けたりして隠す処理を、現実世界の景観に対して行っていることに相当するので、これを「**実世界モザイク**」(*real-world pixelization*)と呼ぶ。

通常の写真では、隠す部分がきまれば直接その場所にモザイク処理を行えばよい。実世界モザイクでは、利用者の視点(頭の位置)に基づいて窓表面の隠すべき場所が変化しなければならない。この処理によって、たとえば外部の景観のうち見たくないものの場所を、居住者の視点位置に基づいてモザイクングすることができるようになる(図 4)。

利用者の頭部位置は屋内に設置されたデプスセンサー(Microsoft Kinect および ASUS XTION-Pro)からの情報で計測している。現在の試作品では Kinect 用のオープンソースライブラリである OpenNI の人体トラッキング機能を利用し、窓の前にいる人物の骨格を認識し、頭部を(実世界の座標系における 3次元位置として)推定する。この位置情報と、隠すべき物体の 3次元位置領域から、窓の不透明にする部分を決定する。

実世界モザイクでは、隠すべき対象物の位置が固定な場合と、移動する場合を考慮している。前者は、景観から特定のものを隠す場合や部屋の中の秘密な情報を隠す場合などに利用する。この場合、窓を眺める居住者の頭部位置を計測し、不透明領域を決定している。後者は、透明なパーティションをはさんで居住者どうしの不要なアイコンタクトを避ける場



図 4. 景観の調停(想像図)。見たくない景色を選択的にマスクする。このマスクは室内の視点変換にもなって、常に同じ場所をマスクするように動的に移動する。

合などに利用する。現状では、パーティションの表と裏に向けて 2 台の Kinect を設置し、両者の位置を計測している。

3.2 プログラマブルな影

Squama の別の応用が採光や日照の制御である。「窓」の元来の機能は外部の光を居室内に取り込むことだが、日照が強すぎる場合、かえって居住性を阻害する場合がある。たとえば、壁面がすべてガラスで構成されたホテルのラウンジのような環境に太陽光が差し込むと、ラウンジにあるテーブルや椅子に直射日光があたり居心地がよい。その結果、太陽の影になっているテーブルに人間が移動するか、手作業でブラインドやカーテンを開閉しなければならない。また居室内の温度が上昇するので空調のために無駄なエネルギーを消費することになる。

Squama では、居室内の利用者が、直射日光を避けたい屋内の部分指定することで、太陽の位置に基づいて影を自動的に作り出す。たとえば上記の例では、テーブルや椅子の部分を影領域として指定すると、変化する太陽の位置に追従して、その領域に日光が当たらないように窓の部分領域が不透明になる。また、テレビやプロジェクタースクリーンのように日光が当たってほしくない場所を指定すれば、その領域を常に影とするように窓の不透明領域が移動

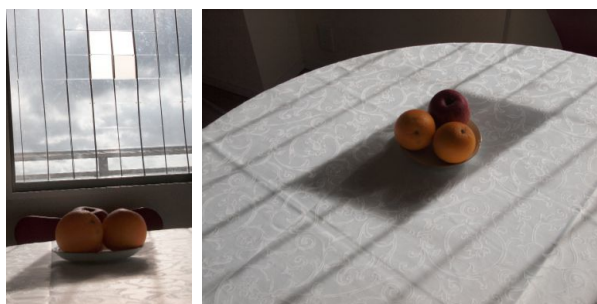


図 5. *Programmable Shadows* (プログラマブルな影): 太陽光を遮断したい領域を指定すると、システムが遮蔽すべき窓の領域を日照の方角から自動的に決定する。



図 6. アンビエントディスプレイとしての利用例

する。これは、窓の透明度をコンピュータからの指令で部分的に変化させることで実現しているが、目的はむしろ影の設定である。つまり、影をプログラムできるという意味で “*Programmable Shadows*” (プログラマブルな影) と呼んでいる。

プログラマブルな影でも、実世界モザイクと同様、影を設定したい領域が移動する場合も考えられる。たとえば、部屋の中の子供や赤ちゃんに影を設定して、強い日照から守りたい場合などである。現状のシステムはこの状況に対応していないが、子供の位置を計測するセンサーとの併用で実現可能だと考えている。

3.3 アンビエントディスプレイ

上記二種類以外の利用方法として、窓全体をアンビエントなディスプレイとして利用することが考えられる [15]。窓全体のイメージがフラッシュするなどして、居住者に情報の変化を提示する。また、前説で述べた「プログラマブルな影」により、影として情報を提示することが可能である。この場合、詳細な情報を提示するというよりも、情報の変化を影の変化として利用者に提示できることが特徴であり、窓に目をむけていなくても利用者の注意を引くことができる。日常生活において、天気急激な変化には自然に気づくように、情報の変化を景観や日照の変化に近い形で提示できる (図 6)。

4 議論: Mediated Reality (調停可能現実) としてのプログラマブル建築

本論文で提案したシステムは、建築空間におけるインタラクティブな面という意味で、従来から研究されている「サーフェスコンピューティング (surface computing)」と関連が深い。サーフェスコンピューティングは、壁面や机などの建築空間でのさまざまな「面 (surface)」がインタラクティブになり、コンピュータへのインタフェースとして用いられる場合の可能性を探求する分野である。専用の国際学会 (Interactive and Tabletop and Surfaces) [3]。なども開催され活発に研究されている。

これらの研究と、Squama を含むプログラマブル建築との方向性の関係について考察する。従来のサーフェスコンピューティングでは、目的はコンピュータへのアクセスであり、そのためのユーザインタフェースとしてサーフェスを利用することについて研究が主に行われていた。一方、住環境そのものを改善しようという発想は必ずしも中心ではなかった。プログラマブル建築では、アンビエントディスプレイのようにコンピュータ情報へのインタフェースとしての利用方法もあるが、日照、プライバシーや景観の制御など、居住者の住む空間そのものの質の向上が主たる目的となっている。とくに「プログラマブルな影」にみられるように、情報ディスプレイとしてのサーフェスではなく、物理的な環境を改善するためのサーフェスの利用が主な研究目的になっている。

さらに、この研究の方向性は、より広義には「調停可能現実 (Mediated Reality)」² と呼ぶべき領域に発展するのではないかと考えている。Mediated Reality では、現実に関与するということよりも、現実に関与する何らかの物理的な性質 (たとえば日照や景観、気温、音響) を調整/調停することで、実空間の快適性を向上させる技術の総称である。

なお、通常のサーフェスコンピューティングと、プログラマブル建築や Mediated Reality の方向性は矛盾するものではなく相補的である、本研究は、従来のサーフェスコンピューティングに対しても新しいアプローチの可能性を提供するものだと考えている。

5 関連研究

Squama で利用されている調光液晶ガラスは、窓やパーティション全体の透明度を変化させたりする目的ではすでに利用されている。Boeing 787 の旅客用窓はエレクトロクロミック材料により、本システムに似た調光機能を有している³。Squama は調

² Augmented Reality は、「拡張現実感」あるいは「拡張現実」と訳されるが、Mediated Reality の目的は、現実が調停されたような感覚を提供することではなく、現実そのものを調停することにある。したがって (「感」をつけずに) 「調停可能現実」を呼ぶのがより適切であろう。

³ <http://www.gentex.com>

光可能な素材をプログラム可能なモジュールとして利用し、窓全体ではなく細かく分割した領域の透明度を変化させている点に特徴がある。その結果、実世界モザイク、プログラマブルな影、アンビエントディスプレイなど、窓全体の透明度を変化させるだけでは得られない効果を作り出している。

Izadi らは液晶シャッターガラスによるテーブルトップシステムを提案している [9]。テーブルトップが不透明なときはリアプロジェクションサーフェスとして機能するが、透明になるとプロジェクション光がテーブルトップを通過してその上の物体に映像を決像する。両者を高速に切り替えることでテーブルトップにも物体にも映像が表示されるようなインタフェースを構築できる。BYU-BYU-View は風を作り出すサーフェスシステムでアレイ上の小型ファンと布地によるスクリーンによって構成されている [13]。

FogScreen は空中に空気層を作り出しプロジェクションによって映像を決像させる [1]。Weightless Wall は居住空間内の音響を区切るためのインタフェースである [14]。音の動的な制御はプログラマブル建築としても興味深いトピックだが、現状は利用者がヘッドフォンを装着することを前提としており、物理空間の音響そのものを制御しているわけではない。

Mann らの “Diminished Reality (減損現実)” は、ウェアラブルコンピュータを利用した現実の景観調停の試みである [10]。通常の拡張現実感、現実の景観に何かを加えることを目指しているが、Diminished Reality は現実の景観から何かを減ずることを特徴とする。たとえば不適切な広告などを視野から削除することを目指している。Squama を利用したプライバシーコントロールや景観の調停も Diminished Reality に関連し、拡張現実感のように現実の情報に付加するだけではなく、現実から何かを差し引くことの可能性を示している。

プロジェクションマッピング [11] は平面に限定されない現実空間の事物にプロジェクターにより画像を投影する技法で、近年さかんに展示会やインスタレーションなどで用いられるようになってきた。プロジェクターの光量が増し、正確に位置合わせされた映像をビルの壁面などに投影することで、壁面そのものが変化するような視覚的效果を与えることができる。たとえばビルの窓が突然動き出すような表現（実際には動いている窓の映像を壁面に投影している）が可能である。本研究で追求しているような建築物の透明性や物理特性そのものを変化するものではないが、建築物に動的な要素を与えようという表現の試みとしては関連がある。

6 結論と今後の方向性

本論文では、建築空間が物理的特性を変化させ、居住者の状況や要求に動的に対応するという「プログラマブル建築」の概念を提案した。その具体的



図 7. 透明液晶を利用した窓の試作例

な建築要素として、光の透過性をモジュールに制御可能な壁面／窓である Squama について報告した。Squama を用いた居住空間の改善の例として、通常の建築空間では矛盾する要求であった開放性／景観の確保とプライバシーを両立させる実世界マスキング（調停現実）や、採光と居住性を両立させる「プログラマブルな影」を提案した。

今回の研究では、プログラマブル建築のうち、光の透過性に主に着目したシステムを提案しているが、居住空間の物理的な特性はそれに限定されるものではない。たとえば他の可能性として、通気性、湿度や音響などの物理要因が、建築要素をプログラマブルにすることでどうやって制御可能になるかを追求していきたい。

今回の実装は液晶調光シートを利用し、10cm 角サイズのモジュールを利用した。この粒度でも本論文で提案したような応用例は充分実現可能であると考えている。一方で、最近の急激な液晶パネルの価格低下にともない、液晶パネルそのものを建築材料として利用することも現実的なものとなっている。建築用的高级なガラスパネルよりも、同面積の液晶パネルのほうが低価格である場合すらある。また、液晶パネルからバックライトを取り除いたものは透過性もあり、窓としての利用可能性がある。図 7 は、透明液晶パネルによる「窓」の試作例である。より細かな粒度で景観を制御できていることがわかる。

光の制御については、面の透過性だけではなく、プログラマブルな照明についても今後検討していきたい。従来から調光可能な照明は存在したが、たとえば発光ダイオードや有機 EL などの発光材料が主たる光源材料となると、天井全体を無数の小さな発光体で多い、全体として居住環境に対する照明として機能するような構成様式が考えられる。

謝辞

システム構築作業に協力して頂いた竹岡義樹、川内見作、上野道彦の諸氏に感謝する。

参考文献

- [1] FogScreen. www.fogscreen.com.
- [2] NSG Umu Products. www.umupro.com.
- [3] *ITS '10: ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ACM, 2010.
- [4] B. Aksak, P. S. Bhat, J. Campbell, M. DeRosa, S. Funiak, P. B. Gibbons, S. C. Goldstein, C. Guestrin, A. Gupta, C. Helfrich, J. Hoburg, B. Kirby, J. Kuffner, P. Lee, T. C. Mowry, P. S. Pillai, R. Ravichandran, B. D. Rister, S. Seshan, M. Sitti, and H. Yu. Claytronics: highly scalable communications, sensing, and actuation networks. *SenSys '05*, pp. 299–299. ACM, 2005.
- [5] M. Coelho, I. Poupyrev, S. Sadi, R. Vertegaal, J. Berzowska, L. Buechley, P. Maes, and N. Oxman. Programming reality: from transitive materials to organic user interfaces. *CHI EA '09*, pp. 4759–4762. ACM, 2009.
- [6] S. C. Goldstein, J. D. Campbell, and T. C. Mowry. Programmable Matter. *IEEE Computer*, 38(6):99–101, June 2005.
- [7] D. Holman and R. Vertegaal. Organic user interfaces: designing computers in any way, shape, or form. *Commun. ACM*, 51:48–55, June 2008.
- [8] H. Ishii, D. Lakatos, L. Bonanni, and J.-B. Labruno. Radical atoms: beyond tangible bits, toward transformable materials. *interactions*, 19(1):38–51, 2012.
- [9] S. Izadi, S. Hodges, S. Taylor, D. Rosenfeld, N. Villar, A. Butler, and J. Westhues. Going beyond the display: a surface technology with an electronically switchable diffuser. *UIST '08*, pp. 269–278. ACM, 2008.
- [10] S. Mann and J. Fung. VideoOrbits on Eye Tap devices for deliberately Diminished Reality or altering the visual perception of rigid planar patches of a real world scene. In *International Symposium on Mixed Reality (ISMIR2001)*, March 14-15 2001.
- [11] M. Naimark. Two unusual projection spaces. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, 14(5):597–605, Oct. 2005.
- [12] J. Rekimoto. Squama: Modular Visibility Control of Walls and Windows for Programmable Physical Architectures. In *Advanced Visual Interfaces 2012*, 2012.
- [13] E. Sawada, S. Ida, T. Awaji, K. Morishita, T. Aruga, R. Takeichi, T. Fujii, H. Kimura, T. Nakamura, M. Furukawa, N. Shimizu, T. Tokiwa, H. Nii, M. Sugimoto, and M. Inami. BYU-BYU-View: a wind communication interface. In *ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, SIGGRAPH '07. ACM, 2007.
- [14] Y. Takeuchi. Weightless walls and the future office. *CHI '10*, pp. 619–628. ACM, 2010.
- [15] M. Weiser and J. S. Brown. Designing Calm Technology. *POWERGRID JOURNAL*, 1, 1996.

未来ビジョン

文化人類学者の梅棹忠夫(1920–2010)は、1960年代に著した「情報産業論」の中で、産業の進化を人間の有機的な発達段階になぞらえた興味深い議論を展開している。人間の産業が、農業、工業、情報の三段階として進化しているとすると、それぞれは人体の発達過程での段階、つまり内肺葉(消化器官や呼吸器官)、中胚葉(筋肉や骨格)、外胚葉(神経や感覚器官)に対応づけられるというのである。

HCIの進化をこの対応関係に基づいて考えてみたらどうなるだろうか。コンピュータは、そもそもは計算を自動化するために発明されたもので、人との関わりは直接には存在しなかった。それが、人間の知的生産を支援するような文書処理、情報検索、オフィスワーク、コミュニケーションなどのためにまず利用されるようになった。すなわち外胚葉に相当する段階としてHCIはスタートした。次の段階では、ユビキタスコンピューティングのように生活や社会基盤に密着したコンピュータの利用方法が進展する。これは梅棹のいう中胚葉段階に該当するといえるだろう。Internet of

ThingsやCyber-Physical Fusionと呼ばれている分野や、デジタルファブリケーションも中胚葉的である。本研究も、建築の未来を対象としておりこの段階に相当する。また、人体そのものの中胚葉段階である、骨格や筋肉にも人とコンピュータの接点はある。知的能力を支援するコンピュータだけでなく、身体的な技能、リハビリテーション、トレーニング、義足や補綴などの分野でのコンピュータの利用も中胚葉的HCIと考えることができる。その次の段階では、内肺葉に相当する農業、食、健康といった分野がHCIの対象となってくる。センサーネットワークによって強化された農業や植物工場、デジタルヘルスケアやパーソナルメディシン、インプラントブルコンピューティングなどがこれに相当する。また料理や味覚そのものの情報技術による向上などもテーマとして魅力的である。

このように、コンピュータと人との関連は、産業の進展の歴史をむしろ逆向きに辿りながら、人類や社会のより基本的な領域を扱うものへと進化している。HCI研究も、情報やコンピュータへのインタフェースだけでなく、社会、環境、生活、身体そのものの質の向上を目指すものに多くの可能性があると考えている。