

WearableEye: ウェアラブルコンピュータによる 情報化環境把握のための視覚化システムの開発

大林 真人[†] 西山 裕之^{††} 溝口 文雄^{††}

本論文では、ウェアラブルコンピュータで一般的に用いられる片目型ディスプレイを使用して、ユビキタス環境やセンサネットワーク環境における情報を効率良く提供するための情報・画像処理手法について述べる。ウェアラブルコンピュータは計算機の常時携帯を行うことによって、ユーザに対して日常のあらゆる場所と時間においてコンピュータ使用を可能にするものである。ユーザはハンズフリーの状態のまま、様々な情報を取得し、処理することが可能となる。ここで、ウェアラブルコンピュータからユーザへの効率的および汎用的な情報伝達手段は、通常の計算機と同様のディスプレイによる表示である。ウェアラブルコンピュータの携帯性を維持するためにはディスプレイの小型化、携帯化が必要とされる。しかし、ディスプレイを小型化することは、単位時間あたりの表示可能な情報量の削減を意味している。解像度を上げることによって一度に表示する情報量を増加させることも可能ではあるが、小型化されたディスプレイ内では、個々の情報の判別が困難になることは必至である。この問題に対して、本研究では、実世界のユビキタス環境で発生する様々なイベントを 12mm 四方の HMD 上で効率良くユーザに伝達する視覚化システムを開発し、その評価を行う。

WearableEye: The Design of Information Visualization of Ubiquitous Environment for Wearable Computer with a Tiny Display

MAKOTO OBAYASHI,[†] HIROYUKI NISHIYAMA^{††}
and FUMIO MIZOGUCHI^{††}

In this paper, we developed the information visualization system of the ubiquitous environment for wearable computer using the small head mount display. A wearable computer enables computer use in all everyday places and time to a user by carrying a computer. The user of a wearable computer can acquire and process the various information with hands-free condition. In this case, a tiny display is the efficient and general-purpose means of communication of information from a wearable computer to a user. The downsizing of the display of wearable computer is the result of pursuit of portability. However, downsizing display reduce the amount of information which can be displayed. It is also possible that raising resolution of wearable display increase the amount of information displayed at once. But, cramming information in the tiny display must be difficult to determine each information. Our information visualization system enables to solve above problems. We use the HMD which has the 12mm square size as the device of our system. And we show the availability of our system through the evaluation experimental result.

1. はじめに

ウェアラブルコンピュータは計算機と操作インタフェースを自然な形で携帯することにより、ユーザに対して様々なサービスを実現することを可能にするものである。これによって、ユーザの周囲に発生する事象やユーザ自身の生理・生態情報をセンシングし、処理

することによってユーザの知覚や記憶等の能力を増大させることが可能であると考えられる。具体的な使用方法としては、小型のディスプレイやカメラをウェアラブルコンピュータとして装着することによって、使用者の周囲の情報や行動履歴を記録かつ管理することを可能にする¹⁶⁾。しかし、ウェアラブルコンピュータで取得できる情報は、自己の周囲および使用者の行動のみである。だが、スマートオフィス³⁾に代表されるユビキタス環境を併用した場合には、環境情報とその変化をも、ウェアラブルコンピュータを通じて、使用者に伝達させることが可能である。ウェアラブルコンピュータを使用してユビキタス環境に生じる様々な事

[†] 東京理科大学情報メディアセンター
Tokyo University of Science Information Media Center

^{††} 東京理科大学理工学部
Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science

象を閲覧することは、次に示されるような利点が考えられる。すなわち、①ハンズフリーでのユビキタス環境へのサービスリクエスト、②ユビキタス環境情報の常時取得、の2つである。これらにより、場所を選ばずに環境状態の変化をとらえることができ、環境への来訪者の存在や、物理的なリソースの状態（ロボットの位置等）を効率的に認識することが可能になる。また、取得した環境情報に従って、あらゆる場所から環境内に散在する各種の物理機器への様々なリクエストを送信することが可能となるだろう。この場合、環境内で発生する各種のイベントや物理デバイス、リソースの状態をユーザに対して提示する必要がある。また、ユビキタス環境においてウェアラブルコンピュータを使用することによって、システム構築やセキュリティの面で様々なメリットがあることも指摘されている^{1),15)}。

ここで重要なことはウェアラブルコンピュータとユーザを結ぶインタフェースである。一般に使用される計算機において、キーボードとマウス、ディスプレイがユーザとのインタフェースとして使用されるのと同様に、ウェアラブルコンピュータと使用者の間における情報伝達を仲介するインタフェースが必要とされる。通常、ウェアラブルコンピュータのインタフェースとしては、使用感や入出力操作における快適さとともに、その携帯性が重要視される。これに従って、様々なインタフェースが提案され、実装されてきた¹⁰⁾。しかし、単位時間あたりの情報表示量を考慮すると、ユーザへの情報提示デバイスとして最も優れているものは携帯可能な小型ディスプレイであると考えられる。ウェアラブルコンピュータにおけるディスプレイは携帯性を重視した結果、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）や腕時計上の画面として実装される。近年の技術向上によって、ディスプレイの解像度は飛躍的に増大する傾向にあり、小型のディスプレイ上においても非常に多い情報量を一度に表示することが可能である。これにより、ユビキタス環境におけるあらゆる情報をウェアラブルディスプレイに表示することによって、ユーザに対する情報提示を行うことも可能と考えられる。しかし、人間の視覚能力は、多少の個人差を考慮しても、限られたものであり、ある一定サイズ以下の文字や画像は判別することが困難となる。したがって、膨大な環境情報のすべてを一度に表示することが可能であったとしても、それを読み取る作業が困難であれば、情報提示の役割を果たすことは不可能だと考えられる。一方、膨大な情報の中から限られた一部のみを取り出して表示することも情報提示手段の1つとして考えら

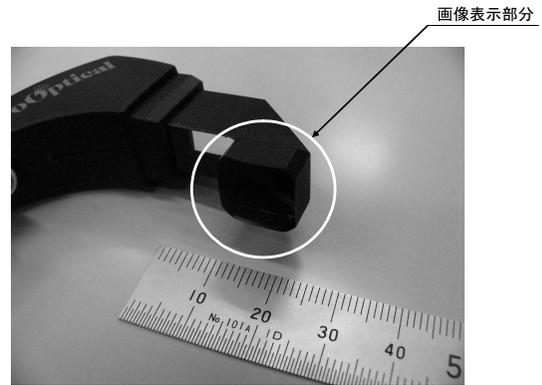


図1 本研究で使用するウェアラブル用ディスプレイ

Fig.1 The small head mount display which we use in this paper.

れる。ユビキタス環境が提供する膨大な情報量のすべてを一度に表示することを断念し、注目する場所の情報のみを線形ズームングを使用することによって表示する手法も考えられる。しかし、この場合には、離れた場所で同時に発生するイベントやデバイスへのリクエストを同時に表示することは不可能である。また、表示領域外で発生した重要な環境情報の変化を見逃すことも十分に考えられる。

本研究では、小型ディスプレイ用の環境情報視覚化システム WearableEye を開発する。これは、上述された問題を解決することを目的としたものであり、膨大な情報を内包するセンサネット環境や、ユビキタス環境の情報をウェアラブルなディスプレイを使用して効率的にユーザに提示することを可能とするものである。本研究で対象とするウェアラブル用ディスプレイは、小型のHMDや腕時計型のコンピュータディスプレイを対象とする。本研究において我々が実装対象とするウェアラブル用ディスプレイは約12mm四方の大きさと640×480の解像度を持つ片目型ヘッドマウントディスプレイであり、図1に示されるような大きさの領域への描画を対象とした視覚化システムを開発する。また、評価実験によって本研究によるシステムの評価を行い、他の情報伝達手法との比較を交えて WearableEye の実用性について考察する。

2. 設計方針

2.1 環境情報の視覚化手法

本研究において提案する視覚化システム WearableEye はウェアラブルコンピュータでの使用を前提としている。よって、ユーザが詳細な情報を獲得する過程において、複雑な操作を必要とするものであってはならない。また、前章で述べたように、小さなサイズの

ディスプレイ (図 1) 内において多くの環境情報を表示する必要がある。有限の表示領域に対して、多くの情報を提示するための視覚化手法は古くから多くの研究が行われている。Pad++⁸⁾ に代表される線形変換を使用した視覚化はユーザが任意に指定した場所を拡大して表示することを可能とする。しかし、拡大処理によって他の部分が画面外へと押し出されることとなり、環境情報全体をつねに概観することを目的とする本研究のシステムには適切ではない。ユーザの注目箇所を拡大し、なおかつ全体を概観する視覚化手法には非線形変換が適している。Fisheye¹¹⁾ は魚眼レンズのように注視箇所を拡大し、その他を縮小して表示することを可能とする。また、この手法によって表示面積よりも大きな領域のすべてのデータを限定した平面に詰め込むことが可能である。しかし、この手法の欠点は変換処理において射影される像が大きく歪むことであり、本来の形状を相似的に表示することが困難となることである。この性質は、表示量の圧縮率が高いほど顕著となる。この問題に対して、二様表示方式¹²⁾ は矩形領域を相似的に射影することで解決している。しかし、この手法は D-ABDUCTOR¹³⁾ のように、膨大な数の矩形の表示データを扱う場合に最も有効な手法であり、本研究のように実環境内に散在する情報の視覚化には適していない。その主な理由として、表示データを区切るための明確な矩形が存在しないことがあげられる。

以上の問題点を考慮して、我々は Hyperbolic Tree⁹⁾ に代表される双曲座標による環境情報の視覚化を行う。Xerox PARC の Hyperbolic Tree は、大規模階層構造の視覚化によるブラウジング支援として開発されたものである。Hyperbolic Tree は非線形変換を行う視覚化手法を用いており、双曲幾何変換によるツリー構造全体の視覚化が可能である。また、マウス操作によって焦点を連続的に移動させることが可能である。この手法の最も大きな利点は、web 上のページに対応する多数のノードによって構成されるツリー構造のすべてを指定の領域内に表示することが可能な点である。また、中心に近いノードは大きく表示し、離れた場所に存在するノードは小さく表示することが可能である。

しかし、Hyperbolic Tree では、ノードの位置関係すべてを双曲幾何によって変換してしまうため、ノード間の位置関係および隣接するノード間を結ぶアークが歪んで表示される。この性質は Web ページのようにノード間の距離が実世界上での意味をなさない場合には閲覧者に対するデメリットはまったく存在しない。その理由は、閲覧者は隣接するノードが明確であれば、

その位置関係には配慮しないためである。

しかし、本研究による視覚化システムにおいて、ノードに対応するものは実世界に備え付けられたセンサ等の機器であり、以後、環境情報描画において実世界のセンサに対応して情報を表示する個々のオブジェクトをノードと記述する。このとき、表示される各ノードは実世界における環境と 1 対 1 に対応するため、双曲変換による表示位置の歪みは重要な問題となる。なぜならば、変換射影されたノード位置の歪みが、ユーザが表示された環境情報から実世界の位置と状態を直感的に読み取ることを阻害するためである。また、表示を試みる情報の量および範囲の大きさに比例して、この歪みは大きいものとなる。

以上の問題点をふまえて、本研究によるウェアラブルコンピュータのための視覚化システムは、以下の設計方針に基づいて実装する。

- (1) Hyperbolic Tree による双曲幾何変換を使用して HMD の 1 画面上で環境情報のほぼすべてを概観することを可能にする。
- (2) ユーザが注視する領域は線形変換のみを使用することによって直感的な情報提示を行う。
- (3) Hyperbolic Tree における円形のスクリーンを楕円形とする。
- (4) ズーミング機能によって表示領域の拡大・縮小を可能にする。
- (5) 簡略的な操作によって閲覧を可能とする。

上述の項目のうち、(1) および (2) は矛盾するものと考えられる。しかし、我々は双曲変換処理の過程において独自の手法を用いることによってこれを解決することを試みる。(3) においては、変換された情報が射影される平面を横軸を長軸とする楕円形にすることによって、本システムの実装対象である HMD の解像度 640×480 を有効に使用することを意図するものである。また、(4) によってユーザに対して状況に応じた視野範囲を提供する。このとき、この操作によって一部の情報が意図せずに欠落することを防止する。また、(5) によりウェアラブルの環境を考慮して情報の閲覧に際して煩雑な操作を避けることを試みる。次に環境の状態変化を示すための視覚化手法について述べる。

2.2 センサ状態の視覚化手法

本研究による視覚化システム WearableEye は、各センサに対応するノードが実世界における環境の観測点および状態を表現するものである。よって、ノードの視覚化表現によって、環境の状態を直観的にユーザに伝達することが必要とされる。様々な情報を内包

するオブジェクトを単純な形で表現する手法は、過去の視覚化における研究においても様々な工夫が見られる。Ohwada らによる WWW 構造視覚化手法⁷⁾ や Hiraishi らによる KAGAMI⁵⁾ は web ページを示すノードを円錐形状として表現し、アクセス回数やコンテンツ内のキーワードに従って、円錐の高さや色彩を変化させている。これは、ユーザへの直感的な Web 構造の理解を提供する手段として非常に効果的であると思われる。ノードとなる Web ページの文書を描画する場合には、複数の web ページの間には物理的な距離や位置の概念がないため、設計者の判断でそれらが重ならないように自由にレイアウトすることが可能である。しかし、本研究による視覚化システムは実世界の環境情報を反映するため、レイアウトの自由度は非常に限定されたものとなる。よって、高さと底面の面積に情報を内包させる手法は隣接する他のノードを侵食する恐れが生じる。また、地球上に発生した地震情報を視覚化する Breathing Earth¹⁷⁾ は地震の震度に比例した半球をアニメーション表示することによって、その位置と規模を非常に分かりやすく閲覧者に示すことを可能としている。この半球は地球を表現する球体中心を通る任意の直線上から球体外側に向けて膨張するように生成される。しかし、この手法は周囲の情報を覆い隠してしまうため、本研究における視覚化システムに対しては適切とは考えられない。

以上の点を考慮して、本研究における視覚化システム WearableEye のノード表現を以下のように決定する。本研究による視覚化システム上でのノード表現の特徴は以下の 2 つである。すなわち、①ノードの基本形状を円形および円錐形とし、観測状態によって変化させる。②ノード円の直径は描画領域中心からの距離を基準にして決定する。③ノードの状態を色彩変化によって表現する。次章においてこれらの実装の詳細を述べる。

3. 実装

3.1 適用環境

本研究の使用対象となるユビキタス環境は東京理科大学の情報メディアセンターであり、スマートオフィスとして機能するための様々なセンサやデバイス、ロボット等がネットワーク化された状態で存在する。また、スマートオフィスの機能を使用した様々なアプリケーションが提案・実装されている³⁾。環境の構成を図 2 に示す。

環境に実装されているセンサは主に 4 種類であり、通行する人間を感知するための人感センサ、ロボット

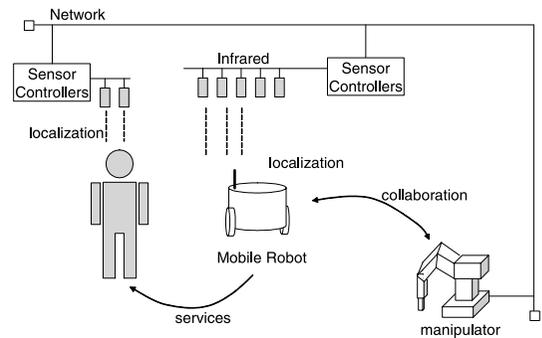


図 2 スマートオフィスの概要
Fig. 2 Configuration of Smart Office.

表 1 スマートオフィスの 1 環境内におけるセンサおよび情報機器
Table 1 Sensors and information appliance in an area of the Smart Office.

機器の種類	個数
ネットワークカメラ (pan-tilt カメラおよび全方位カメラを含む)	9
赤外線センサ(ロボット位置検出用)	37
人感センサ	9
移動ロボット	6
アームロボット	2
各部屋の端末	22

の通行や現在位置を外部から監視するための赤外線センサ、環境内に存在する物体を検出するレーザセンサ、および画像処理によって動作物体を検出するためのパンチルトカメラや全方位カメラである。人間やロボット等の動作物体は、すべてこれらのセンサと動画像処理によって位置や状態を常時認識することが可能である¹⁸⁾。また、人感センサや赤外線センサは Echelon 社の LonWorksNetwork によってすべてがネットワーク化されており、専用のルータによって環境内における LAN に接続されている。これにより、各センサによる情報のすべてをネットワークを通じて取得することを可能にしている。また、環境内には移動ロボットやアームロボットが複数台設置されており、ユーザからの指示や要求によって様々なサービスを行うことが可能である¹⁴⁾。また、ウェアラブルコンピュータによって環境内のデバイスを操作することも可能となっている¹⁹⁾。次に本実験環境におけるノードの種類およびその数について示す。実験環境の各階において状態は異なるが、一部の階層は表 1 に記載される機器から構成される。

本研究によるウェアラブルコンピュータのための視覚化システムは、上述された環境情報の様々な状態や変化を効率的にユーザに提示することを可能にするものである。次に視覚化システムの実装の詳細について

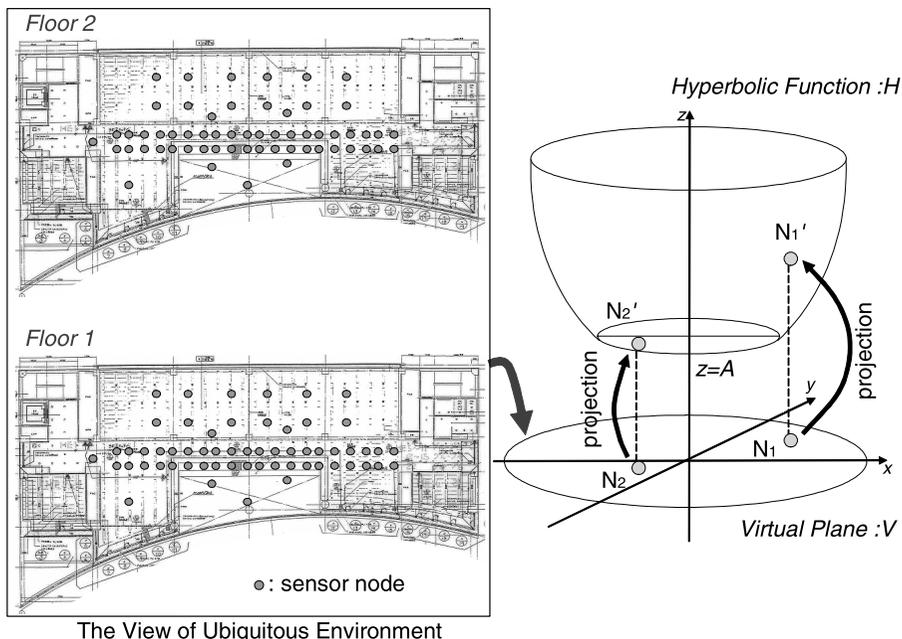


図 3 双曲座標を利用したノード描画位置の変換 1. 左図：環境マップとセンサノードの配置
 図. 右図：センサノード座標から双曲平面への射影
 Fig. 3 Drawing position conversion of nodes using hyperbolic function (Step1).

述べる .

3.2 視覚化システムの実装

2章における設計方針で述べたように, WearableEye におけるウェアラブルディスプレイへの環境情報の視覚化には Hyperbolic Tree に代表される双曲座標による変換を用いる. これにより, 環境情報のほぼすべてを画面内に表示することが可能となる. また, ユーザが目にする箇所は線形ズームを使用することによって, 直感的な情報の取得を容易にする. 次にノード変換のアルゴリズムの詳細について述べる.

図 3 において, 左側の図は実験環境とセンサの配置図である. 図から確認できるように, 環境情報を内包するノードとなるセンサの位置座標と環境の地図は, 実世界における状態に従って忠実に表現されている. しかし, 図に示されるような環境をはじめ, 複数の建物から構成される情報化環境を表示するためには, 画面内に入る情報は一部のみとなり, 他の領域は画面外へと押し出されることとなる. 一方, すべての環境情報を 1 画面内に収めるためには極端な縮小処理を行う必要があるだけでなく, 個々の情報が潰れてしまうことは必至である. ここで, 全ノードと環境の位置を一定のスケールで忠実に描画する平面を仮想平面と呼ぶ. また, 仮想平面のとりうる大きさは無限とする. これらのノードを双曲座標に従って変換するとき, その操

作は図 3 右のとおりである. この場合, 各ノードを双曲平面上に射影した場合, その座標は式 (1) によって表される.

$$\begin{cases} \text{if}(z \geq A) \\ (x_{hi}, y_{hi}, z_{hi}) = (x_i, y_i, \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + 1}) \\ \text{else if}(1 \leq z < A) \\ x_{hi}^2 + y_{hi}^2 = r^2 \end{cases} \quad (1)$$

ここで, x_i, y_i は仮想平面 V 上におけるノード座標であり, x_{hi}, y_{hi}, z_{hi} はそれぞれ双曲座標に変換された座標を示す. また, r は $z = A$ における円の半径を表す. 次に, 各ノードの双曲座標と点 $(0, 0, -1)$ を結ぶ線分を求め, ノードを楕円平板 O への射影を行う. ここで, 楕円平板と射影後のノード座標は式 (2), 式 (3) のとおりである.

$$\frac{x^2}{a^2} + y^2 < 1, z = 0, (a > 1) \quad (2)$$

$$(x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}) = \left(\frac{ax_{hi}}{z_{hi} + 1}, \frac{y_{hi}}{z_{hi} + 1}, 0 \right) \quad (3)$$

ここで, WearableEye における視覚化手法が Hyperbolic Tree による手法と異なる点は, 双曲座標における z 軸上の任意の点 A (ただし $A > 1$) において双曲関数を切断することにある (図 3 および図 4 を

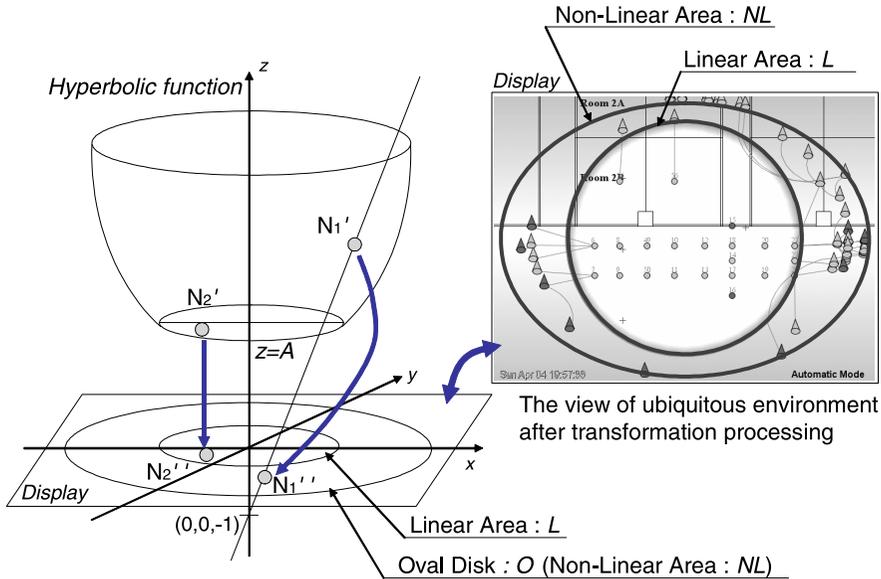


図4 双曲座標を利用したノード描画位置の変換2. 左図: 双曲平面から楕円平板への射影. 右図: $z=0$ の描画平面に射影された環境内センサノード情報

Fig. 4 Drawing position conversion of nodes using hyperbolic function (Step2).

参照). 切断面は $x^2 + y^2 = A^2 - 1$ を満たす円形となる. これにより, 仮想平面中心から直径 $\sqrt{A^2 - 1}$ の範囲に配置されるノードは双曲座標による変換をうけずに楕円平板へと射影されるため, 一部のノードを線形ズームのみで表示することを可能とする. これらの処理により, 図3右における仮想平面上に配置されたノード N_1 および N_2 は, 式(1)によってそれぞれ座標変換される. このとき, N_1 は通常の上双曲平面上に射影されるが (N_1'), N_2 は $z=A$ における円形領域内に射影される (N_2'). この結果, 図4の処理によって, N_2' は, 図4右内中央の円形の線形領域内に射影, 表示される (N_2''). その一方で, N_2' は式(2)および式(3)に従って変換され, 円外の非線形領域に表示されることとなる (N_1''). 表示画面内における, これらの線形および非線形領域の場所は, 変換後の環境情報描画画像を示す図4右において明示されている線形領域 L と非線形領域 NL に示される円および楕円の内部となる. これにより, 一連の視覚化処理を表す図3および図4によって, 画像表示領域中心から一定の範囲に含まれるノードを線形ズームで描画し, その他のノードのすべてを双曲変換によって画面内に表示することが可能となることが確認できる. また, 任意の倍率における拡大処理を行った場合においても, すべてのノードを画面内に収めることが可能である.

図5にすべてのセンサノードを双曲変換した視覚化画像(左図)と, WearableEyeによる視覚化画像(右図)の比較を示す. 左図では, ユーザの視点中心(画像中心)から周囲に位置するノードの距離に従ってすべてのセンサノードが双曲変換によって非線形に変換されていることが確認できる. また, ズームの倍率にかかわらず, 環境内のすべてのセンサノードがディスプレイ内に収められる. しかし, この画像からは実空間における各センサの場所や位置関係を把握することが不可能であることも容易に理解できる. これに対して, 右図は本研究による視覚化手法であり, ユーザの注視領域となる中央の円形領域内の情報が線形的に表示されることが確認できる. 線形領域中のセンサノードは, ズーム倍率に従って, 実世界の位置関係を忠実に反映する. また, 線形領域は $1 \leq A$ の範囲で自由に変更することが可能である. これにより, ユーザは環境内のすべてのセンサノードのイベントを見ながら, 注視領域の状態を直観的に把握することが可能とする.

3.3 ノード表現の実装

図6および図7にイベントが発生したノード表現の例を示す. ノードの基本図形は円形および円錐形として表示され, その直径は描画領域中心からの距離に逆比例して決定される. 画像中心から非常に遠隔に存在するノードは, 双曲変換によって射影円盤の縁に射

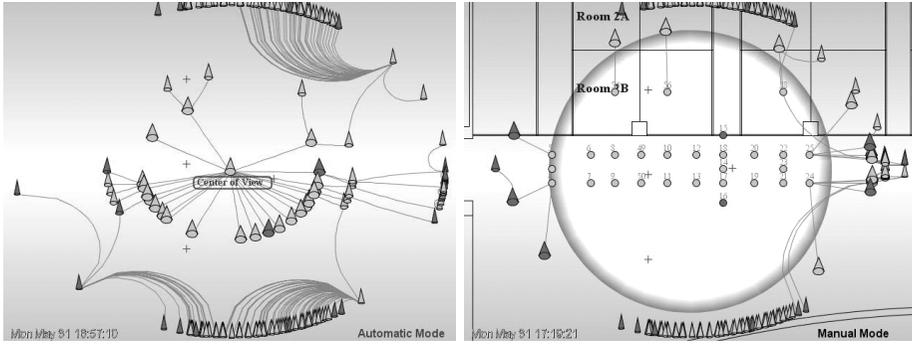


図 5 視覚化手法の比較：すべてのセンサノードを双曲変換した場合の視覚化手法（左），本研究による視覚化手法（右）

Fig. 5 Left figure: The figure is the case of that all sensor nodes are transformed by hyperbolic function. Right figure: The figure is the case which displayed all the nodes using our technique.

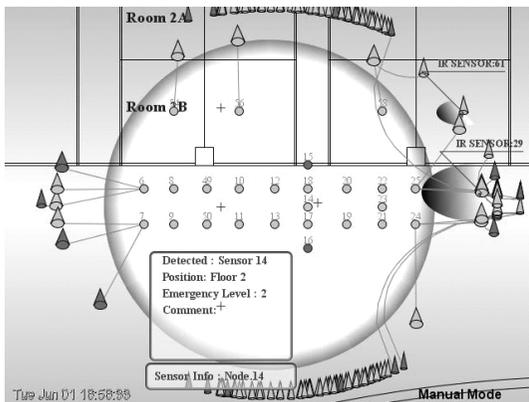


図 6 イベント発生時におけるノード表現
Fig. 6 Representation of status of nodes.

影される．このとき，射影円盤の縁に近いノードは小さく表示されることによって，ノードが密集する際の重なりを軽減し，大規模なノード数を持つ環境情報の表示を可能にする．

図 6 に示されるように，非線形領域においてイベントが生じたノードは円錐の高さ等の形状を変化させるとともに，ノードとその周辺の色彩をグラデーションを使用したアニメーション処理によってユーザによるイベントノードの認識と特定の補助を行う（図中右側のノード群）．イベントを表現するノード形状として円錐型を採用した理由は，表示領域の減少と高さによるイベントの重要性の定量的表現を両立するためである．また，円錐の高さは内包するイベント情報の重要度と描画領域中心からの距離によって決定される．特に双曲座標上において $z = A$ となる線形表示領域においては，図 6 のように，センサノードの情報の詳細を別ウィンドウによって表現する一方で，ノードの色

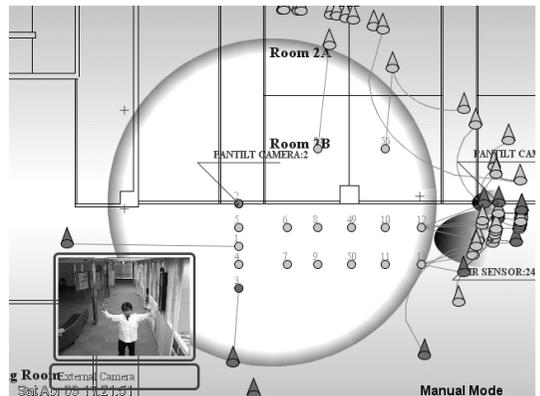


図 7 環境内カメラによる動画像表示
Fig. 7 Show movie captured by a camera in real environment.

彩変化・点滅による表示のみとする．これにより，描画領域中心付近に存在するノードの形状変化を抑制することが可能となり，線形領域内のノード間の重複表示を軽減することが可能となる．また，中心から離れた非線形領域では，イベントが発生したノードの特定が容易となる．

3.4 視覚化システムの操作および操作インタフェース

ウェアラブルコンピュータを使用するうえでの最大のメリットの 1 つは，ハンズフリー（もしくはそれに近い）状態での操作が可能であることである．これを高速かつ迅速に行うことを可能にするインタフェースとして小型のキーボード⁶⁾をはじめとして，音声認識による入力，指の振動を利用する FingRing⁴⁾ 等が提案されている．しかし，これらの操作性はデスクトップ環境において使用されるキーボード，マウスを超え

るものではない！納豆ピュー²⁾は、3次元表示されたWWW空間に対して「もちあげ」等の操作を行うことによって効果的な閲覧を可能とする。しかし、本研究における視覚化システムはウェアラブルコンピュータ上での運用を前提としているため、上述されたデバイスの使用を考慮し、簡潔な操作によって使用できることが要求される。

本研究による視覚化システムにおいては、ユーザが行う操作として以下の3種類があげられる。すなわち、①特定のノードからの情報取得、②特定の環境領域またはノードを画面中央に移動させる操作、③環境内のカメラが提供する動画や画像処理結果の表示・非表示操作である。通常のデスクトップ環境では、マウスを用いることによってクリックやドラッグを行い、上記の操作をたやすく実現することが可能であるが、ウェアラブルコンピュータの運用状態で同様の操作性を維持することは非常に困難である。しかし、上述した項目のように、本研究における操作は、表示領域内における特定のポイントに対するものであり、これにはポインタによる操作が一番適切であると考えられる。これにより、本研究による視覚化システムでは、ハンディマウスに類似したデバイスを使用し、画面上に表示されるポインタの移動によって各種の操作を行うことを前提とする。そして、図6および図7に示されるように、線形領域上に存在する特定のノード上にポインタを移動させることによってノード情報の詳細を表示することを可能とする。また、ノード情報の表示ウィンドウには透過処理による描画を行うことによって、ウィンドウの背後に位置する一部の環境情報が消失することを防止する。特定ノードを線形領域に移動させる操作は、本研究による視覚化システムにおいて必ず必要となる操作である。本システムでは、通常のインタフェースのように、ドラッグによって焦点を自由に移動させることが可能である。また、特定ノードをクリックすることによって、指定ノードを画面中心に移動させることも可能である。この両者における処理はほぼ同一であり、後者では初期位置から目的位置までの焦点移動を有限に分割されたステップ数によるアニメーションとして実現される。ここで、焦点移動はノードの表示領域となる楕円平面上では実行されることがないことに注意されたい。すなわち、楕円平面上の各ノードの位置から、実平面上の位置を逆射影を行うことによって算出し、再び双曲関数による射影処理によって、移動結果が反映される。また、線形領域のノードは実平面上に逆射影された座標系を基にして選択される。HiraishiらやLampingらは双曲座

標上における等長変換および、ポワンカレ円盤から双曲座標への射影・逆射影を用いることによって全ノードの移動処理を行っている^{5),9)}。しかし、本研究による視覚化システムでは、一定の条件を満たすノードは双曲座標による変換処理を行わないため、つねにノードの仮想平面上における座標を算出し、変換処理の選択を行う必要が生じる。これにより、本研究におけるノード移動処理は以下のように一般化される。双曲座標上の点 $R(rx, ry, rz)$ が中心 $O(0, 0, 1)$ に移動するとき、双曲座標上における任意のノード i において、 $P_i = (P_{ix}, P_{iy}, P_{iz})^T$ から $Q_i = (Q_{ix}, Q_{iy}, Q_{iz})^T$ への等長変換は以下のとおりである。

$$Q_i = T_1 \begin{pmatrix} -1 + \frac{2}{1-\sigma^2} & 0 & -\frac{2\sigma}{1-\sigma^2} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{2\sigma}{1-\sigma^2} & 0 & -1 + \frac{2}{1-\sigma^2} \end{pmatrix} T_2 P_i \quad (4)$$

ここで、 $\sigma = \sqrt{rx^2 + ry^2}$ 、 $\sin\theta = ry/\sigma$ 、 $\cos\theta = rx/\sigma$ とする。また、 T_1 および T_2 は以下のとおりである。

$$T_1 = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ここで、上式で得られた P_i の仮想平面上における座標が $X^2 + y^2 \leq A^2 - 1$ を満たすとき(ここで $A > 1$)、最終的に楕円平面に射影されるノード座標 P_o は以下のように算出される。

$$P_o = f P_i * Z + K \quad (5)$$

ここで、 f は双曲座標から仮想平面への射影、 Z は拡大率、 K は原点からの偏差である。それ以外の場合には式(4)によって得られた座標を楕円平面に射影する。射影処理は式(2)、(3)に示されるとおりである。

4. 評価実験および考察

4.1 複数の被験者による評価実験

本研究によって開発された視覚化システムであるWearableEyeの有効性を示すために数人の被験者によって本システムを使用し、その結果を通じて評価を行う。有効性の評価尺度として、環境内に生じた特定のイベントを検出するまでの時間を計測する。実験には、6人の被験者を用意し、各個人ごとに実験を行った。実験は以下に示す手順によって行われる。①被験

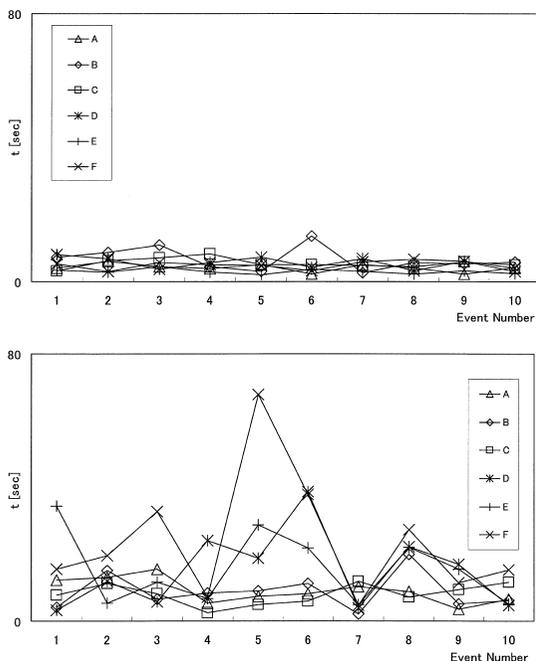


図 8 実験結果 1: イベントが発生したノードをユーザがとらえるまでの時間. 上図は本論文による視覚化システムを用いた場合, 下図は線形ズームのみの表示を用いた場合の結果を示す
Fig. 8 Experimental result 1: Required time for detecting the node which display the event occurrence. Above graph: The result of our visualization system. Below graph: The result of normal drawing (without any visualization technique). The x-axis shows the number of event. The y-axis shows elapsed time.

者に HMD を装着させ, 発見目標となるイベントの内容を説明する. ②ランダムに決定された時間が経過した後, 環境内においてイベントを発生させる(ここでイベントが発生した事実は被験者に伝えない). ③被験者が指定のイベントを発見したときの経過時間を記録し, 実験を終了する. ここで, 本システムとの比較として, ノードの双曲変換を行わない線形ズームのみを使用した視覚化システムを併用し, 同じ被験者に同様の実験を行わせることによって比較を行う.

次に, 実験の結果から得られたデータに基づいて, WearableEye とウェアラブルディスプレイを使用した環境情報提示の効率性を議論する. 図 8 は被験者が HMD を使用して環境内で発生したイベントをとらえるまでに要した時間を示している. グラフ中に示されるデータの数値は 6 つであり, それぞれが異なる被験者によって測定されたものである. 図 8 上は本研究で開発した視覚化システムによる結果を示しており, 図 8 下は本研究によって提案される双曲変換を行わずに, 線形的なズームのみの表示を使用した結果である. グラフより, 本研究による視覚化手法の効果は

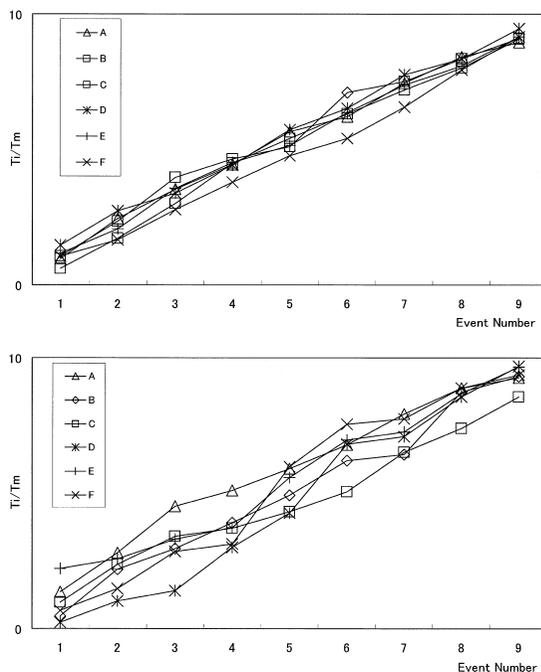


図 9 実験結果 2: 実験結果 1 の各データを各被験者の平均ノード補足時間で無次元化したグラフ. 上図は本論文による視覚化システムの結果. 下図は線形ズームのみの表示による結果を示す
Fig. 9 Experimental result 2: Required time for detecting the node which display the event occurrence. Each plotted required time for event number is sum of previous required time. Above graph: The result of our visualization system. Below graph: The result of normal drawing (without any visualization technique). The x-axis shows the number of event. The y-axis shows the elapsed time divided by average detection time of the node of each subject.

明白に現れていることが確認できる. 本研究による視覚化システムの結果を見ると, 被験者がノード検出に要した時間は, 多少の変動が認められるものの, ほぼ一定であることが認められる. これにより, すべての被験者が環境情報の変化の位置にかかわらず安定した操作を行うことが可能であったと考えられる. 一方, 線形ズームのみの使用による通常のノードマップを使用した場合の実験結果(図 8 下)を参照すると, どの被験者の結果においても非常に変動が大きいことが確認できる. これは, 環境内で発生したイベントを瞬時, かつ直感的に認識することが困難であることが原因と考えられる. 対象ノードをとらえるまでの時間を単純に比較した場合, 図 8 下のグラフが短時間である場合も存在する. しかし, これはイベントの発生地点が注視位置に近かった場合であり, 偶然的な要素の強い結果であると考えられる. 総合的に 2 つのグラフ

表 2 他の情報伝達手法との比較

Table 2 Comparison with other information presentation methods.

表示手法	正確性	伝達速度	全体の把握	直観性
本研究による手法				
音声伝達		×	×	×
局所表示			×	

を比較すると、明らかに図 8 下の結果が時間を要していることが確認できる。

図 9 は同じ被験者による実験結果を示したものであり、被験者とデータの並びは図 8 と同様であるが、経過時間は累積されたものを用いている。環境内におけるイベント情報を取得するまでの時間を各被験者が実験全体を通じてイベント情報検出に要した時間の平均 (T_m) で割ることにより無次元化してプロットする。被験者の間には操作インタフェースや HMD の使用に対する慣れや熟練度についての違いが存在する。これによって、被験者間の実験データ上に大きな相違が生じる。所要時間の無次元化を行うことによって、各被験者の誤差を吸収することを目的とする。図 9 上は、本研究による視覚化システムを使用した結果であり、すべての被験者のデータが、ほぼ同一線上に表れることが確認できる。一方で、通常の描画方法を用いた図 9 下の結果を参照すると、図 9 上と比較して、データ間の差が非常に大きいことが分かる。図 8 と図 9 より、一定した評価結果を示す我々の視覚化システムは、ユーザに対して直感的な情報伝達と操作性を提供することが可能であると考えられる。

4.2 他の手法との比較と考察

ウェアラブルなデバイスにおいて、ユーザへの情報伝達手段にはディスプレイの表示のほかに音声による伝達も有効な手法として考えられる。表 2 に本研究における視覚化手法と他の手法との比較を示す。比較評価の項目として、ユーザに情報を伝達する場合における正確性、伝達速度、全体の把握、直観性について評価する。また比較の対象となる手法については、本研究による視覚化手法のほかに、局所表示による情報表示および音声による情報伝達について考慮する。

ここで、情報の正確性については、音声伝達が最も適していると思われる。これは、自然言語を用いた音声出力によってイベントの位置や内容を正確に表現することが可能であるためである。一方、各種の視覚化手法を用いた画像描画による表現は、情報の抽象化を行うため、正確性はやや落ちるとと思われる。また、情報の伝達速度に関しては、音声による情報提供が不利であることは明らかである。なぜならば、情報の全体

を知るためには、音声を最後まで聞かなければならなためである。環境全体の把握については、本研究における手法が有効であることは前節の評価実験において示されている。その一方で、音声および局所表示に関しては、環境全体を一度に表現することは不可能である。また、直観性については、一瞥して情報を取得することができる画像表示に大きな利点がある。これらの結果より、本研究における視覚化手法は、すべての点で最適ではないが、多くの点で優れているといえるだろう。

5. ま と め

本研究では、ウェアラブルコンピュータによるユビキタス環境の効率的な情報提示を実現する視覚化システム WearableEye を開発した。ウェアラブルコンピュータによるユーザへの情報提示機器には、非常に小型のディスプレイが使用されるのが一般的である。しかし、小型のディスプレイでは、膨大な環境情報を内包するユビキタス環境の情報を一度に表示することは非常に困難となる。一方、一部分の情報を表示するだけでは、ユーザが重要なイベントや事象の変化を見逃す恐れが生じる。また、高解像度のハードウェアを利用して小型ディスプレイ内に膨大な情報を一度に表示することも可能である。しかしながら、この場合には、情報量の増加に従って情報ごとの表示領域は小さくなり、個々の情報を判別することは不可能となるだろう。

この問題に対して、我々が開発した WearableEye は、双曲変換による非線形ズームと線形ズームの両方を使用することによって解決した。ウェアラブルディスプレイには、12 mm 四方のサイズと 640×480 の解像度を持つ片目型ディスプレイを使用し、ユーザの注視箇所を分かりやすく表示するとともに、その他のすべての環境情報を画面内に描画することを可能にした。これにより、ユーザは線形的にズームされた注視箇所とその周辺の情報閲覧を行いながら、他の環境情報の変化のすべてをとらえることが可能となる。そして、これらの効率性を複数の被験者による評価実験によって明らかにした。

参 考 文 献

- 1) Rhodes, B.J., Minar, N. and Weaver, J.: Wearable Computing Meets Ubiquitous Computing: Reaping the best of both worlds, *Proc. ISWC'99*, pp.141-149, IEEE Computer Society (1999).

- 2) 塩澤秀和, 西山晴彦, 松下 温: 「納豆ビュー」の対話的な情報視覚化における位置づけ, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.11, pp.2331-2342 (1997).
- 3) Mizoguchi, F., Nishiyama, H., Ohwada, H. and Hiraishi, H.: Smart office robot collaboration based of a multi-agent programming, *Artificial Intelligence*, Vol.114 (1999).
- 4) 福本雅朗, 平岩 明, 曾根原登: ウェアラブルコンピュータ用キーボード fingering, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J79-A, No.2, pp.460-470 (1996).
- 5) Hiraishi, H. and Mizoguchi, F.: WWW Visualization Tools for Discovering Interesting Web Pages, *Progress in Discovery Science*, pp.650-660 (2002).
- 6) <http://www.handykey.com>
- 7) Ohwada, H. and Mizoguchi, F.: Integrating Information Visualization and Retrieval for WWW Information Discovery, *Theoretical Computer Science* 292, pp.547-571 (2003).
- 8) Hightower, R.R., Ring, L.T., Helfman, J.I., Bederson, B.B. and Hollan, J.D.: Graphical Multiscale Web Histories: A Study of Pad-Prints, *ACM Conference on Hypertext* (1998).
- 9) Lamping, J., Rao, R. and Pirolli, P.: A Focus+Context Technique Based on Hyperbolic Geometry for Visualizing Large Hierarchies, *Proc. ACM CHI'95* (1995).
- 10) Ouchi, K., Suzuki, T. and Doi, M.: Life-Minder: A Wearable Healthcare Support System Using User's Context, *ICDCS Workshops 2002*, pp.791-792 (2002).
- 11) Sarkar, M., Brown, H.H. and York, W.: Graphical Fisheye Views of Graphs, *Human-Computer studies*, March '92 (1992).
- 12) 三末和夫, 杉山公造: 図的思考支援を目的とした図の多視点遠近画法について, 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.8, pp.997-1005 (1991).
- 13) 三末和夫, 杉山公造: 図的発想支援システム D-ABDUCTOR の開発について, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.9, pp.1739-1749 (1994).
- 14) 溝口文雄, 西山裕之, 大林真人, 嶺 行伸, 山崎航: スマートアシストを実現するための行動支援ソフトウェアの開発, AIST-TR-2001-014 (2001).
- 15) Minar, N., Gray, M., Roup, O., Krikorian, R. and Maes, P.: Hive: Distributed Agents for Networking Things, *Proc. ASA/MA '99* (1999).
- 16) Sakata, N., Kurata, T., Kato, T., Kouroggi, M. and Kuzuoka, H.: WACL: Supporting Telecommunications Using Wearable Active Camera with Laser Pointer, *Proc. 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC2003)*, pp.53-56 (2003).
- 17) Takemura, S. and Nishimura, Y.: Designing a Public Sensory Platform on the Net, *Proc. INET'98* (1998).
- 18) 高橋正樹, 西山裕之, 溝口文雄: カメラロボットの協調動作による人物追跡システムの設計, 第17回人工知能学会全国大会 (2003).
- 19) 魚住 健, 大林真人, 西山裕之, 溝口文雄: ユーザ補助のためのウェアラブルなシステムの設計, 情報処理学会第64回全国大会 (2002).

(平成 15 年 12 月 10 日受付)

(平成 16 年 9 月 3 日採録)



大林 真人 (正会員)

2003年東京理科大学大学院理工学研究科博士後期課程修了, 博士(工学)。現在, 東京都立産業技術研究所任期付研究員。アクティブRFIDおよびユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 日本ロボット学会各会員。



西山 裕之 (正会員)

1995年東京理科大学工学部経営工学科卒業, 1997年東京理科大学大学院理工学研究科経営工学専攻博士前期課程修了, 2000年同大学院理工学研究科経営工学専攻博士課程修了。工学博士。同年同大学工学部経営工学科助手となり, 現在に至る。分散システム, マルチエージェント, ネットワークセキュリティに興味を持つ。日本ソフトウェア科学会, 人工知能学会, 日本ロボット学会各会員。



溝口 文雄（正会員）

1968年東京理科大学大学院修士課程修了，同年同大学理工学部経営工学科助手．1987年教授となり，現在大学院研究科委員および情報メディアセンター長．工学博士．1994年

Stanford 大学の Center for the Study of Language and Information (CSLI) の上級研究員となる．人工知能，認知科学およびソフトウェア工学に興味を持ち，Java を用いた情報家電や自律型ロボットの研究を中心に進めている．最近では，GRID 環境におけるライフサイエンスプロジェクトを推進しており，2002年12月に IBM の Shared University Research (SUR) Award を受賞したほか，2003年3月には情報メディアセンターが日本初の SUN の COE (Center Of Excellence) として選定された．現在 Artificial Intelligence Journal の論文編集委員．日本ソフトウェア科学会，日本認知科学会，米国人工知能学会，IEEE 各会員．
