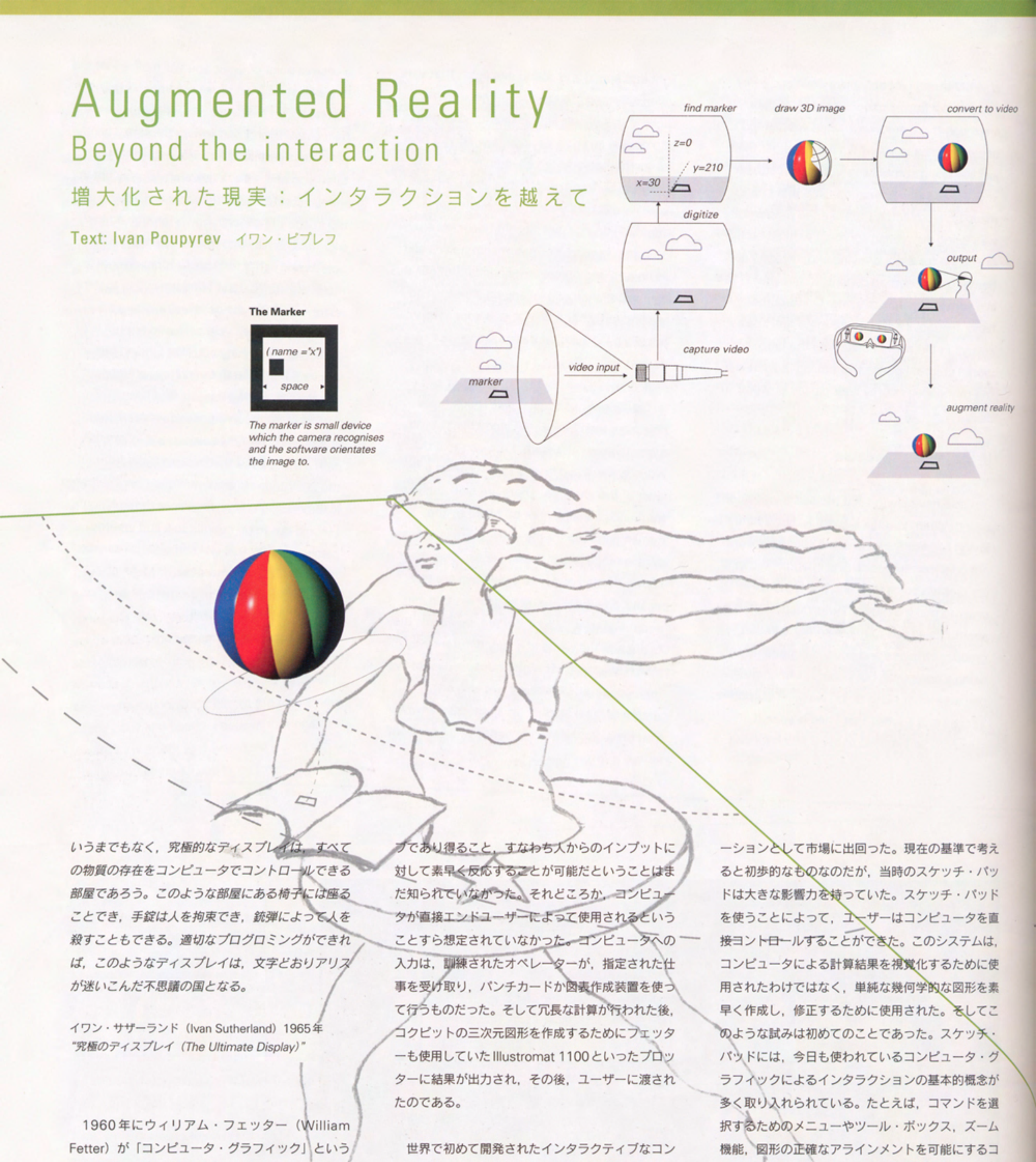
Augmented Reality

Beyond the interaction

増大化された現実：インタラクションを越えて

Text: Ivan Poupyrev　イワン・ピプレフ



The marker is small device which the camera recognises and the software orientates the image to.

いうまでもなく，究極的なディスプレイは，すべての物質の存在をコンピュータでコントロールできる部屋であろう。このような部屋にある椅子には座ることでき，手錠は人を拘束でき，銃弾によって人を殺すこともできる。適切なプログロミングができれば，このようなディスプレイは，文字どおりアリスが迷いこんだ不思議の国となる。

イワン・サザーランド（Ivan Sutherland）1965年
"究極のディスプレイ（The Ultimate Display）"

1960年にウィリアム・フェッター（William Fetter）が「コンピュータ・グラフィック」という用語を新しく作り出した。「コンピュータ・グラフィック」とは，当時，彼がボーイング社製の航空機のコクピットをデザインするために取り組んでいた新しいデザイン技術を指していた。初期のコンピュータ・グラフィックのアプリケーションは，エンジニアリングや科学情報のための視覚的コミュニケーションとしての役割に重点を置いていた。その頃はまだ，コンピュータ・グラフィックがインタラクティブであり得ること，すなわち人からのインプットに対して素早く反応することが可能だということはまだ知られていなかった。それどころか，コンピュータが直接エンドユーザーによって使用されるということすら想定されていなかった。コンピュータへの入力は，訓練されたオペレーターが，指定された仕事を受け取り，パンチカードか図表作成装置を使って行うものだった。そして冗長な計算が行われた後，コクピットの三次元図形を作成するためにフェッターも使用していたIllustromat 1100といったプロッターに結果が出力され，その後，ユーザーに渡されたのである。

世界で初めて開発されたインタラクティブなコンピュータ・グラフィック・プログラムは，1963年にMITリンカーン研究所にいたイワン・サザーランドによるスケッチ・パッド（Sketch Pad）である。スケッチ・パッドは，当時まだ目新しかった9インチの白黒ディスプレイとライトペンを備えた，実験的コンピュータTX２のために作成された。TX２は後に商品化され，初めての実践的パーソナル・コンピュータ，DEC PDP-1およびPDP-6ワークステーションとして市場に出回った。現在の基準で考えると初歩的なものなのだが，当時のスケッチ・パッドは大きな影響力を持っていた。スケッチ・パッドを使うことによって，ユーザーはコンピュータを直接コントロールすることができた。このシステムは，コンピュータによる計算結果を視覚化するために使用されたわけではなく，単純な幾何学的な図形を素早く作成し，修正するために使用された。そしてこのような試みは初めてのことであった。スケッチ・パッドには，今日も使われているコンピュータ・グラフィックによるインタラクションの基本的概念が多く取り入れられている。たとえば，コマンドを選択するためのメニューやツール・ボックス，ズーム機能，図形の正確なアラインメントを可能にするコンストレイント機能など多種多様の手法である。スケッチ・パッドは，世界初のグラフィック・ユーザー・インターフェースだっただけでなく，今日アーティストやデザイナーによって使われているすべての２Ｄグラフィック・ツールや３Ｄモデリング・ツールの先駆けであった。そしてさらに重要なのは，スケッチ・パッドを使用することによって，人類が，コンピュータの中でのみ存在する，現実の物体では

ない，コンピュータによって合成された完全に人工的な仮想のオブジェクトに初めて直に触れることができたということである。スケッチ・パッドは，コンピュータに対する考え方や，生活の中でのコンピュータの位置付けに重要な変化をもたらし，最近広まり始めたばかりである一連の考えに筋道をつけたのである。

1960年代にサザーランドによって初めて明らかにされた考えとは，コンピュータ合成されたグラフィックが，イメージ作成のための効果的で強力なツールとなっても，決して単純に紙の替わりとなることはないということである。そのかわり，原子ではなくデジタル・データから作られた新しいオブジェクトをコンピュータ合成し，制御することが可能となる。このオブジェクトは，デジタルなオブジェクトでありながら，テーブルの上に置いてある鉛筆やコーヒーカップと同じくリアルであり，現実世界の一部である。これらのデジタルなオブジェクトはわたしたちの空間に浸透し，現実と仮想の境目がない世界をもたらす。このような世界には，デジタルなオブジェクトと物理的なオブジェクトの両方が共存し，人が両方のオブジェクトを同じように取り扱うことができる。これがデジタル的ARの世界なのである。1967年に発表された論文「究極のディスプレイ（The Ultimate Display）」でサザーランドはこの考えの概要を説明しているが，この論文が仮想現実およびAR（Augmented Reality：増大化された現実）の原点であると一般的に認められている。

このことから，インタラクティブ３Ｄコンピュータ・グラフィックが目指す究極的な方向は画像作成ではないといえるかもしれない。将来的に私たちの生活にもっとも影響を与えるであろう概念の変化は，３Ｄコンピュータ・グラフィックが二次元のスクリーンに限定されずに，まったく新しいタイプのデジタルなオブジェクトとして物理的な現実世界に進出することである。コンピュータ・グラフィックとのインタラクティブなやりとりという概念にも重大な変化をもたらすだろう。例えばペンや紙，コーヒーカップとはインターフェースを接続する必要がない。これらはただ使用すればいいものであり，マウスやキーボードを使ってコーヒーをいれるようなことはしない。同様に，将来，デジタルなオブジェクトは私たちの周りにある日常のものと何ら変わることなく，自然でありふれた，つまらないものとなるだろう。これらのデジタルなオブジェクトは多くの場合，現実の物体に埋め込まれ，そして現実のものと同じ方法で使われる。コンピュータとのインタラクティブなやりとりという概念そのものがなくなることもありえるだろう。

信じがたいかもしれないが，ARについての研究は，コンピュータ・グラフィックおよびインターフェース・デザインの分野で最近，急速に発展している。私自身この８年間，インタラクティブなARの応用方法を広範囲に渡り研究している。ARのシステムを作るための基本原理は単純である。人間は感覚器官である目や耳や皮膚を介して常に流れ込んでくる情報を受け取っている。この情報に手を加えるのだ。コンピュータを使えば，人間の感覚器官が受け取っているデータに別の情報を慎重に入れ込み，コンピュータによって合成されたデータがあたかも現実世界の一部と映るようにすることができる。

ARシステムを実用化する方法は数多くある。ARの研究では，いわゆるビデオ・シースルー技術を使うことによって，仮想の３Ｄのオブジェクトを現実の環境に重ねて見ることができる。仮想と現実の融合は，周りの空間に複数の四角形のマーカー（コンピュータのカメラが簡単に認識できる単純なグラフィック画像のプリントアウト）を配置することによって可能となる。これらのマーカーは，本や壁といった異なるオブジェクトに貼り付けたり，あるいは手で容易に動かすことができるカードにそれぞれ貼り付けたりすることもできる。ユーザーが着用するゴーグルは前部に小型カメラが取り付けられており，ユーザーが見ている方向を向くようになっている。カメラからのビデオ・ストリームはコンピュータに送られ，解析され，マーカーの位置が特定される。その後コンピュータ・グラフィック・エンジンがビデオに写っているマーカーの上に３Ｄのオブジェクトを描き込み，この情報はユーザーが着用しているゴーグルに送り返される。その結果，ユーザーはカメラを通して自分の周りの世界を見ることになり，ビデオの中で作られた３Ｄグラフィックがマーカーの上に配置されることによって強化された環境を自分の周りに見るのである。コンピュータの性能が良ければ，このシステムはほぼリアルタイムで高性能なストリーミングを提供することができ，ユーザーが頭を動かしても常に視点に合わせて正しい見え方をするよう，マーカーに配置されたオブジェクトが作成される。

このシステムにはいくつかの特性がある。複数のユーザーが同じ仮想のオブジェクトをそれぞれ自分の視点から同時に見ることができ，そしてそれを見ている互いの姿も見ることができる。仮想の３Ｄオブジェクトとインタラクティブなやりとりをするには，マウスやキーボードといった入力装置は必要ない。ユーザーは，単にマーカーを拾い上げ，現実の物体と同じように動かせばいいのである。つまり，３Ｄグラフィックの仮想オブジェクトはある意味，現実世界の一部となり，ユーザーは物理的なオブジェクトと同じようにこれを手で取り扱えるようになる。もっとも単純な方法を使えば，ユーザーはゴーグルすら着用する必要がない。コンピュータに接続されたカメラの前にマーカーを置いて，スクリーン上で３Ｄの仮想オブジェクトを見ればいいのである。スクリーン上で仮想のオブジェクトを見るという体験は，鏡をのぞいたときにあるはずのないものが見える，ということと似ている。たとえば，マーカーを貼り付けた本を手に持って，その映像をスクリーン上で見ると，現実に存在する本や，本を持っている手が見えるが，現実に存在しないものも見える。マーカーに配置された仮想の３Ｄ画像も見えるのである。

私たちはARの技術のさまざまな応用方法を吟味している。たとえば，私がビリンガースト（Billinghurst）博士と加藤博士と一緒に開発している「マジック・ブック・プロジェクト（Magic Book project）」では，マーカーを使って普通の本が強化されている。このシステムを使ってユーザーが本を読むと，本のページから３Ｄ画像が飛び出すようになっているのだ。マジック・ブックは単純な仕掛けの飛び出す絵本に似ている。私たちはマジック・ブックの応用としてインタラクティブなカタログや取扱説明書やマニュアル，そしてビジュアル・ストーリーテリングなど，さまざまなアプリケーションを製作した。具体的にいうと，私たちが開発したマジック・ブックうちのひとつは椅子の作り方の説明書である。説明文を３Ｄグラフィックで強化し，椅子を作る課程が段階を踏んで説明されている。現在，マジック・ブック・プロジェクトの価値はシェブロン社などをはじめたくさんの企業に認められている。また，2001年のディスカバリ・マガジン科学技術賞エンターテイメント部門を受賞している。

「タイル（Tiles）」と名づけられた別のプロジェクトでは，マジック・ブックのアイデアを発展させて，空間的なデザインや配置におけるARを利用したアプリケーションを研究している。マーカーを配置した複数の紙製のタイルを作り，それぞれのマーカーには特定の仮想のオブジェクトが配置される。これらのマーカーを平面上に置けば，複雑で仮想の構造を素早く組み立てることができ，複数の人によって同時に変更を加えることができる。私たちは，ダイムラー・クライスラー社のデザイナーやエンジニアと共同で航空機のコクピットにある計器板をレイアウトし，評価を可能にする簡単なプロトタイプのアプリケーションを作成した。

将来のARの研究はどのようなものになるか。忘れてならないのは，人が現実の立体物を認識するとき，視覚にだけ頼っているわけではないということである。触覚も重要な感覚であり，何かが現実かどうかの究極的な判断は触感でなされる。つまり，物体に触れるということはその物体が現実だということなのだ。触覚は，形状といった物体の空間的な特性を理解するために使われる。複雑な立体形も，手で触ることによって素早く見分けることができる。仮想のオブジェクトの感触が伝わるよう，仮想現実の環境に触覚という要素を加える研究が将来的に重要になるであろう。

"The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet displayed in such a room would be fatal. With appropriate programming such a display could literally be the Wonderland into which Alice walked."

Ivan Sutherland *"The Ultimate Display" 1965*

William Fetter coined the term "computer graphics" in 1960 to refer to new design techniques that he was pursuing at Boeing for aircraft cockpit designs. The earliest applications for computer graphics were mainly concerned with the visual communication of engineering and scientific information. The idea that computer graphics can be interactive, i.e. immediately respond to human input, was completely foreign in those days. In fact, computers were not intended to be directly used by the end user at all, instead a trained operator would receive job assignments and input these into the computer using punch cards or tabulators. The results, after lengthy calculations, would be drawn on a plotter, such as Illustromat 1100 that was used by Fetter to create his 3D aircraft cockpit drawings, and then handed back to the user.

The first interactive computer graphics program was the famous Sketch Pad developed by Ivan Sutherland at the MIT Lincoln Laboratory in 1963. It was built for an experimental TX2 computer equipped with a nine-inch black and white display and light pen, both novelties in 1963. TX2 was later commercialized as the DEC PDP-1 and PDP-6 workstations, the first hands-on personal style computers to hit the market. Although it may seem rudimentary today, Sketch Pad was hugely influential. With Sketch Pad the user was in immediate control of the computer, and the system was used not for visualization of computations but for rapid creating of and modifications to simple geometrical drawings, something which had not been done before. It introduced many of the computer graphics interaction ideas that are used today: menus to select commands, toolboxes, zooming in and out of drawings, constraints for precise alignment of drawings as well as many others techniques. It was not only the first ever graphic user interface, it was a direct precursor to all 2D drawing and 3D modeling programs that are used today by artists and designers. More importantly, for the first time the human could directly touch and manipulate objects not made from physical materials, but which were completely artificial, virtual, created and existing only via computer. Sketch Pad started an important shift in the way we think about computers and their place in human lives in general, and put into motion a set of ideas that have only just recently begun to blossom.

The key ideas suggested by Sutherland was that computer generated graphics may not simply be a substitute for paper, no matter how effective or powerful it could be for creating images. Instead, the computer can create and control new types of objects, digital artifacts that are made not out of atoms but digital data and that are nevertheless an equal and equivalent part of the physical world no less real then a pencil or a cup of coffee on the table. These digital objects would permeate our space resulting in one seamless world that is neither real nor virtual, a digitally augmented reality where both digital and physical objects co-exist and can be used by humans in a similar way. In Sutherland's paper "The Ultimate Display", published in 1967, he outlines elements of this vision and this is universally considered to be the starting point of virtual reality and augmented reality.

Thus the most profound direction that interactive 3D computer graphics is heading may not be in creating images. In the future, 3D computer graphics will not be confined to the 2D screen anymore but will extend into our physical world with a whole new digital class of objects. The notion of interacting with computer graphics will also significantly change – indeed, we do not say that we have to interface with a pen, a piece of paper or a cup of tea. These are just things that we use; we do not need to have a mouse or keyboard to make a cup of tea. Similarly, in the future digital objects will become as natural and familiar and probably as dull as any of the other everyday things that surround us. The notion of interaction with computers may cease to exist all together.

Far fetched as it seems, the research on augmenting reality has been rapidly expanding recently in computer graphics and interface design. The basic principle in creating augmented reality systems is simple. Humans receive a constant stream of information from receptors – our eyes, ears and skin. This stream of information can be altered, and by using computers additional information can be carefully inserted into the stream of data that our senses receive so that computer

特別企画：Augmented Reality 誌上実験

今号の「IDEA」を使って強化現実を体験することができる。まず，コンピュータに簡単なカメラ（安価なUSBカメラで十分である）を接続し，「IDEA」のウェブサイト（http://www.idea-mag.com）からARアプリケーションをダウンロードする。ダウンロードしたアプリケーションには，ソフトウェアのインストール方法と使用方法の説明書が含まれている。コンピュータに接続したカメラを，今号巻末にあるマーカーに向けると，コンピュータのスクリーン上にページから飛び出している3Dオブジェクトを見ることができる。強化現実のテクノロジーについてのより詳しい情報は「IDEA」のウェブサイトおよび下記の著者の経歴に記載されているウェブサイトを参照すること。

Special Project：Augmented Reality on IDEA

You can experience augmented reality yourself with this issue of IDEA by downloading a sample augmented reality application from the IDEA web side (www.idea-mag.com). To use this software all you will need is a simple USB or conventional Digital Video (DV) video camera attached to your computer. By pointing a camera at the pages of this issue with the printed squares, called markers, on them (at the end of this issue), you will see on your computer screen 3D objects popping out from the pages. More detailed instructions on how the software should be installed and used can be found in the downloaded files and on the IDEA website. For more general information on this technology please see the information resources on the IDEA magazine website, as well as the website cited in the author's biography.

generated data will appear to be part of the real world.

There are many ways to implement augmented reality systems. In our work we use the so-called video-see-through technique whereby it is possible to see virtually created 3D objects overlaid onto the real environment by placing multiple square markers – simple printed graphic images that the computer camera can easily recognize – in the environment around us. These markers can be attached to different objects, such as a book or a wall, or they can be attached to individual cards that can be easily moved and manipulated by hand. The user wears goggles with a miniature camera attached in front so that it points in the direction the user is looking. The video stream from the camera is sent to the computer where the video is analyzed and marker's position is found in the video. The computer graphics engine then draws 3D objects on top of the markers in the video and the resulting video stream is then sent back to the goggles the user is wearing. As a result the user sees the world around him or her through the video camera and can see the natural environment augmented with 3D graphics (rendered inside of the video) placed on top of the markers, wherever they are located. Depending on the computer the system can provide near real time high performance tracking and rendering, so that as the user moves his or her head the objects on the markers are always rendered from the correct perspective.

The system has some unique properties. Multiple users can see the same object but from their own personal perspective and can discuss the virtual content while at the same time still see each other. To interact with 3D virtual objects no input devices, e.g. mouse and keyboard are required, and all the user needs to do is to simply pick up the markers and move them around, just like any other physical object. Hence the 3D graphic objects become in a sense a part of the real world, and the user can manipulate these objects in the same way as any other physical objects - by using their hands. In the simplest case the user does not even have to wear the goggles, instead the user just points a marker in front of a camera attached to the computer and sees the 3D graphic object on the screen. The experience is not unlike looking into a mirror and seeing something that is not 'there'. For example, if you are holding a book with a marker attached to it, you will see on the computer screen everything that is there – the book, your hands holding the book and also what is not 'there' – the 3D virtual image attached onto the marker.

We have investigated a variety of different applications where augmented reality technology can be used. In the Magic Book project, for example, developed by Dr. Billingshurst, Dr. Kato and myself a conventional book is enhanced with the markers, and when the user looks at the book using our system, 3D illustrations pop out from the pages. The basic metaphor for the Magic Book is the simple pop-up book. We have implemented a variety of applications using the Magic Book: visual story telling, interactive catalogues, instruction books and manuals. For example, one of the Magic Books that we developed teaches how to build a chair by enhancing text instructions with 3D models illustrating step-by-step chair assembly. The Magic Book project is currently being evaluated for practical application by a number of companies such Chevron and it also won the Discover Magazine technology award in 2001, in the entertainment category.

In the Tiles project we investigate applications of augmented reality in spatial design and layout. We created multiple paper tiles each with a marker representing a desired virtual object or an operation associated with the tile. By arranging tiles on any surface a complex virtual structure can be quickly assembled and modified by several people at a time. Working with the designers and engineers from Daimler Chrysler we created a simple prototype application that allows them to rapidly layout and evaluate instrumental panels for aircraft cockpits.

What is the future of augmented reality research? An important point that we should not forget is that our perception of 3D reality is not based on vision alone. Touch is a powerful sense that is the ultimate proof of what is real – if we can touch something, then it is real. Touch is used to understand spatial properties of the objects, such as form – complex 3D shapes can be rapidly distinguished by manipulating them in the hand. Adding the element of touch to augmented reality environments so that we can feel virtual objects is an important future research direction. Similar to touch, sound will also be 3D: it will become spatial. Finally, as computing power is rapidly increasing with size decreasing, mobile augmented reality will become common. The augmented reality experience will not be just confined to the built environment, but will be available anytime and anywhere: even at the beach.

Dr. Ivan Poupyrev

イワン・プピレフ（Ivan Poupyrev）博士は，ソニー・コンピュータ・サイエンス研究所の助手であり，コンピュータによる強化環境に関するテクノロジーの研究をしている。プピレフ博士はこの８年間，仮想現実およびARの研究を進めてきた。その間，広島大学で学位論文を書き上げ，HITL，ワシントン大学，京都にある株式会社国際電気通信基礎技術研究所（ART）で客員研究員として研究し，現在はソニーで研究を継続している。
プピレフ博士はSIGGRAPH などの主要な研究会議で研究成果を発表し続けており，現在はAddison Wesley 社より出版予定の３Dataユーザー・インターフェースについての本を著している。博士への連絡は poup@csl.sony.co.jp にメールを送るか，またはソニー・コンピュータ・サイエンス研究所のウェブサイト（http://www.csl.sony.co.jp/person/poup）を参照のこと。マジック・ブックおよびタイルの両アプリケーションの開発に使われたARツール・キットのより詳しい情報についてはHITLのウェブサイト（http://www.hitl.washington.edu/artoolkit）を参照のこと。

Dr. Ivan Poupyrev, is an associate researcher in Sony Computer Science Lab Incorporated where he investigates technologies for computer augmented environments. He has been researching virtual and augmented reality for last eight years – while he worked on his dissertation at Hiroshima University, as well as in work he did as visiting researcher at Human Interface Technology Laboratory, University of Washington, and ATR Institute in Kyoto. Poupyrev has presented his work at major research conferences such as SIGGRAPH and is currently writing a book on 3D user interfaces to be published by Addison Wesley. He can be contacted at the poup@csl.sony.co.jp or through the web site http://www.csl.sony.co.jp/person/poup/ For more information about the AR ToolKit software library that has been used in developing the Magic Book and Tiles applications please refer to the www.hitl.washington.edu/artoolkit