コミュニケーションツールのための簡易型ARシステム

椎尾一郎　山本吉伸

コンピュータを服のように体に装着して，日常生活のあらゆる場面で人々の活動を支援するウェアラブルコンピュータの実用化が進んでいる．高性能で安価な小型コンピュータと無線ネットワーク，軽量な装着型ディスプレイ，高性能バッテリーと省電力ハードウェアにより，従来のデスクトップコンピュータに匹敵する機能を持つコンピュータ装置を身につけて携帯することが可能になった．その結果，ウェアラブルコンピュータは一部で商品化されて，メンテナンスや製造などの限られた分野で実用化されている．しかしながら，アプリケーションの多くは，デスクトップコンピュータで使われているシステムをそのまま外で使う形態が多く，誰でもウェアラブルコンピュータを使いたくなるような魅力的なアプリケーション（キラーアプリケーション）に欠けている．筆者らは，ウェアラブルコンピュータのキラーアプリケーションの一つは，人々のコミュニケーションを支援するメディアへの応用であると考えた．そこで，仮想の手描きメモによるコミュニケーションをウェアラブルコンピュータにより実現する「空気ペン」システムを試作し，位置検出等の性能評価と，試用したユーザからのフィードバックによる評価を行った．

A Simple AR System for Casual Communication.
Itiro SIIO, 玉川大学工学部, Faculty of Engineering, Tamagawa University.
Yoshinov YAMAMOTO, 独立行政法人 産業技術総合研究所, サイバーアシスト研究センター, A.I.S.T. Cyber Assist Research Center.
コンピュータソフトウェア, Vol.19, No.4(2002), pp.2–9.
2001 年 5 月 11 日受付.

1　空気ペン

図 1 に空気ペンシステムの概要図を示す．透過型ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着したユーザが，空中で描画ペンデバイスを動かすことで，その場所の空中に仮想の手描きメモを描画することができる．このメモ書きはサーバコンピュータに格納されて，透過型 HMD を装着した別のユーザと共有できる．この結果，空中に書き込んだメモ書きによるコミュニケーションを実現する．漫画「ドラえもん」に登場する道具「空気クレヨン」に準じた機能や応用を実現するデバイスであるので，空気ペンと命名した．

空気ペンは，透過型 HMD を使用した拡張現実 (Augmented Reality: AR) システムである．同様の機能は，既存の実験的な AR システム [1] を利用すれば容易に実現可能である．ただし，従来の AR シス

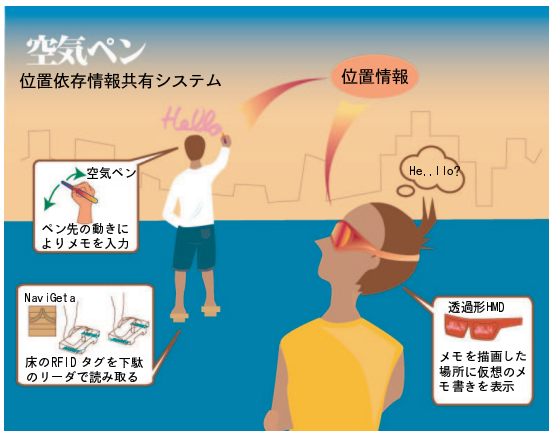

図 1　空気ペンの概念図．

テムの研究は，精度は高いが，高価で限られた空間でしか使えない装置を使う場合が多い．これにたいして，空中への手描きによるカジュアルなコミュニケーションツールには，従来の本格的な AR システムで要求されるような高度なリアリティは必ずしも必要ではない．センサの精度，ディスプレイの視野角などの性能を落としたり，実世界物体のレジストレーションなどの機能を省略しても十分に実用的である．一方で，実験室の限られた空間ではなく，建物全体や，公共の場や屋外などの広い空間にローコストで適用できる位置センサなどが必要になる．そこで，安価・小型で広い範囲に渡って稼働するセンサや，市販の製品を利用した入手が容易な装置を組み合わせて試作した．その結果，表示品位や精度が低下するが，その許容の程度を評価することも課題であった．

空気ペンはユーザが装着するクライアントシステムと，描画情報を保持して配送するサーバで構成される．サーバには，Linux 上で開発されたサーバプログラムが稼働し，メモ書きデータの保存と配送のサービスを提供している．サーバコンピュータには，過去に描画したメモ書きデータが保存されているので，複数のユーザでこの情報を見ることができる．クライアントシステムとしてユーザが携帯・装着するデバイスは，ウェアラブルコンピュータ，描画ペンデバイス，透過型 HMD，各種センサである．クライアントシステムとサーバとは無線 LAN で接続される．図 2 にクライアントシステムの全容を示す．

ウェアラブルコンピュータはウェストポーチに格納されたサブノート PC (200MHz Pentium プロセッサ) である．ウェアラブルコンピュータでは，Windows 上の Visual C++で開発されたプログラムが作動し，ユーザの立ち位置と視線方向にあるメモ書きを閲覧する機能，描画ペンデバイスの操作によりメモ書きを作成する機能，サーバコンピュータと描画データを送受信する機能を提供している．

描画ペンデバイスを，図 3 に示す．ジャイロセンサ，加速度センサを内蔵したジャイロマウスの機構を内蔵しており，2 軸の回転を検出する．これによりユーザが，前面の仮想平面に対して描画する際の，平面上の 2 次元の軌跡を記録できる．ペンデバイスの測定結果は，微弱電力のワイヤレス通信によって送出され，利用者が身につけたウェアラブルコンピュータに入力される．本体下部は開閉式のふたになっており，持ち運ぶときには卵型でありながら手にもったときにしっかりとグリップを握ることができるようになっている．電池が内蔵されたグリップ部には押しボタン（マウスのボタンに相当）が二つ装備されている．

図 2　仮想のメモ書きをしている様子．

透過型 HMD と方向センサを図 4 に示す．透過型 HMD には，小型軽量で低価格な SVGA 出力対応の HMD (SONY PC グラストロン PLM-S700) を使用した．ステレオ視には対応していないが，メモ書きを表示する応用には十分な性能である．HMD には，ジャイロセンサ，加速度センサ，地磁気センサによる低価格の 3 軸方向センサ (Tokin 試作機) を取り付け，ウェアラブルコンピュータの USB ポートに接続した．本センサにより，ディスプレイを装着したユーザの顔の向きと傾きを知ることができる．ユーザの顔の向きの移動と反対方向に，ディスプレイの内容を移動させるプログラムにより，あたかもその方向にメモ書きが

図 3　描画を行うペンデバイス．ジャイロセンサによるマウス機構を内蔵している．

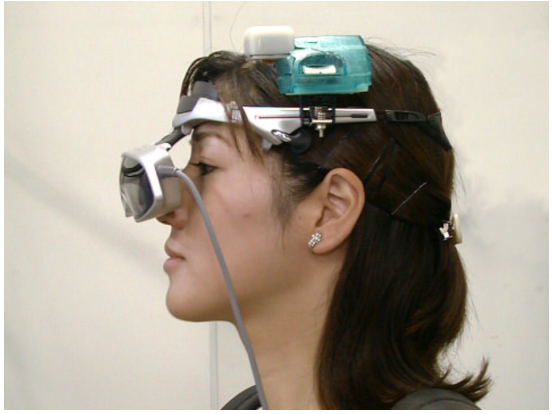

図 4　頭部に装着した透過型 HMD とジャイロセンサ．

表示されているかのような仮想現実感を実現する．

本装置を装着したユーザが仮想の手描きメモを描画するには，描画ペンデバイスのボタンをクリックする．すると描画のためのボードが視野中央に現れる．ユーザはこのボードに対して描画する．描画中は，頭を動かしてもボードは視野中央から移動しないようにした．このインタフェースは，複数の方式の描きやすさを比べて決定された．描画終了後に再びボタンをクリックすればボードが空間に浮遊しているように表示される (図 5)．描画情報は二次元の平面である．描画情報は，ユーザが描画を完了した時点で，無線 LAN 経由でサーバに転送される．

図 5　空気ペンで描画したメモ書きの例．

2　ID カーペットと NaviGeta

仮想的に空中に書かれたメモ書きを実現するためには，ユーザの顔の向きだけでなく，ユーザの立ち位置を検出する必要がある．空気ペンの初期の試作 [11] では，超音波を利用した市販のセンサ (Inter Sense IS-600) を用いた．従来の AR システムで採用される磁場や超音波を利用した位置センサは，1mm 程度の誤差範囲での 3D 位置測定が可能であるが，高価であり，稼働範囲も数 m 程度である．部屋全体，建物全体，公共の広場全体に本センサを張り巡らし，不特定多数のユーザが利用することはコストの観点から現実的ではない．超音波のセンサの精度は 1mm であったが，ペンやユーザの視線方向に求められる精度と比較して，ユーザの絶対位置は必ずしも高精度である必要はなく，実質的には 10cm 程度の精度があれば十分な効果が得られることが，初期の試作による主観的な評価からわかった．

屋外においては，高精度な GPS によりユーザ位置を検出して，十分な拡張現実感を得ることが可能である [3]．しかし高精度な GPS 装置は，高価で大型であるばかりでなく，屋内では GPS を利用することができない問題がある．そこで筆者らは屋内でも使用できる簡易型の絶対位置測定センサを検討して，RFID (Radio Frequency Identification) システムを利用した方式を採用した (図 6)．これは床に敷設した RFID タグを，履物に取り付けたリーダで読み取ることで，

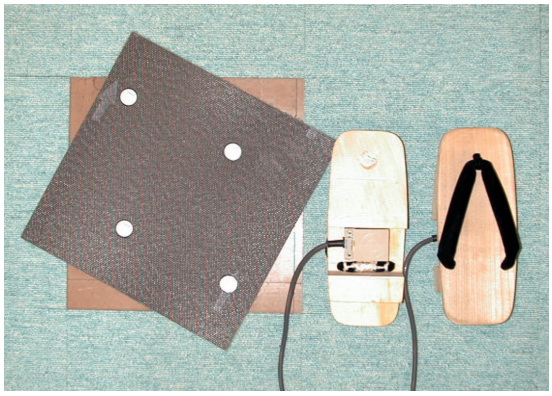

図 6 RFID タグを敷設した ID カーペットと，RFID リーダを装着した NaviGeta．

人の立ち位置を検出する方式である．本センサと，前述の方向センサにより，ユーザの立ち位置と頭部の 3 軸方向が分かる．初期の試作 [11] と比較して，本システムではユーザ頭部の高さ方向の位置を検出していない．

RFID システムは，ID タグ（RFID タグ）の持つ情報を，タグリーダ／ライタ（RFID リーダ）からの電磁誘導により非接触で読み書きするシステムであり，バーコードなどと同様に，物流，製造，販売，人員管理の場面で利用されている [6], [2]．RFID タグの多くは，RFID リーダから電磁誘導により供給される電力により無電源（電池を搭載しない）で動作する．床などの環境側に RFID タグを複数貼付して，ウェアラブル機器などに RFID リーダを取り付ければ，あらかじめ位置が判明している RFID タグを読みとることで，ユーザの位置を検出できる．

本研究では，円盤形の無電源 RFID タグ (OMRON V700-D13P21, 直径 23 mm, 厚さ 1.2 mm) と，RFID リーダ (OMRON V700-HMD11) を使用した．採用した RFID リーダは，小型 (40 x 53 x 23 mm) であるためウェアラブルデバイスや携帯デバイスに組み込みやすい．このシステムは 125kHz の電磁波を使用して，1 個の RFID タグに最大 112 Byte の情報を読み書きすることができる．この組み合わせで交信可能な RFID タグとリーダの位置を見ると，図 7[†1] のように RFID リーダ前面の直径と高さがほぼ 40 mm の円柱の範囲で交信可能であることがわかる．交信に必要な時間は，電力供給に 66ms，データ読み出しに 8 Byte あたり 48ms であるので，この範囲に RFID タグが 114 ms 以上留まっていれば，8 Byte の情報を読み出せる．

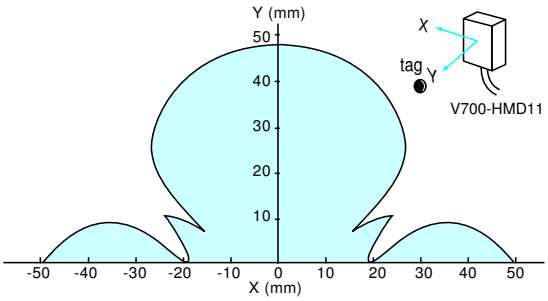

図 7 RFID リーダの指向特性．

2.1 ID カーペット

人の位置を検出できる床面を作る目的で，一辺が 30 cm の正方形タイル状のカーペット（協和トレフィット 30，厚さ 7 mm）の裏面に，一枚あたり 4 個の RFID タグを取りつけた（図 6）ID カーペットを試作した．RFID タグにはそれぞれ個別の ID を書き込んでおき，RFID リーダで読み取れば，タイルカーペット上の RFID リーダの位置を 15 cm の解像度で求めることが出来る．このタイルカーペットを 64 枚作成して，2.4 x 2.4 m の床に敷設した．使用した RFID タグは 256 個である．

RFID タグは，正方形格子状ではなく，図 6 のように交互にずらして取りつけた．全体としては図 8 のような，最密充填に近い二等辺三角形型に配置される．この配置により，円形の検出範囲を持つ RFID タグ同士の干渉を低減する効果が期待される．一方，廊下での歩行のように，人が建造物の特定方向に直進する場面がある．正方形格子状の RFID タグ配置では，人が格子の間を直進することで RFID タグが検出されない可能性もある．RFID タグを交互にずらすことで，廊下などの歩行において RFID タグの検出率向

†1 http://www.omron.co.jp/ib-info/

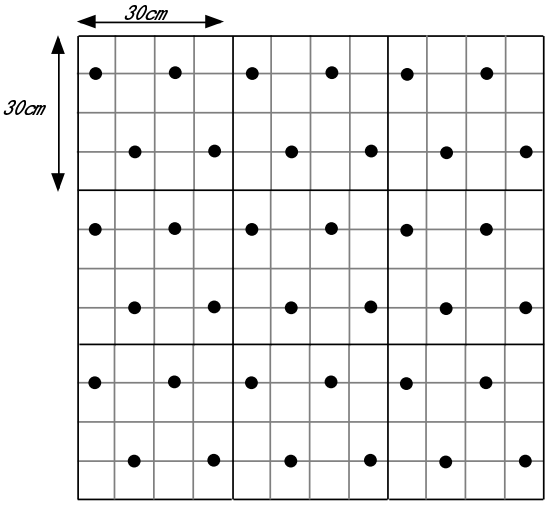

図 8 RFID リーダの指向特性．

上も期待できる．

コストとのトレードオフがあるものの，カーペットに取り付ける RFID タグの密度を上げれば，位置検出の解像度を向上させることができる．図 7 に示した RFID 検出範囲の特性から，RFID タグを 40 mm 程度の間隔まで近づけることができるので，位置分解能は 4 cm まで向上させることが可能である．これ以上の密度で配置した場合は，複数 RFID タグの同時読みとり処理が必要になる．しかし読みとり時間が長くなり，後述する一歩あたりの読みとり頻度が低下するので不利である．

本研究で使用した RFID タグの価格は，1 個あたり約 500 円である．今回試作したタイルカーペットを例えば 100m^2 の部屋に敷設することを考えると約 220 万円のコストがかかる．一方，最近は，13.56MHz や 2.45GHz などの高周波帯の RFID タグも使われるようになってきている．これらは PET 樹脂のフィルムに印刷したアンテナで稼働するので，125MHz 帯の RFID タグの 1/10 程度の価格にできる．近い将来，RFID タグの価格は 1 個 10 円程度になるとの予測もある [2]．その場合，タイルカーペットに RFID タグを数枚取りつけたとしても，タイルカーペット価格 (300 円程度／ 1 枚) と比べてコスト増は問題にならない程度になり,「位置を知ることができる・情報を読み書きできる建材」として普及する可能性もある．

本方式を，従来の AR システムなどで利用される磁気や超音波を使用する位置検出システムに比べると，解像度が低いものの，検知可能面積あたりのコストは非常に安価である．また検知領域を拡張する場合にも，RFID タグの敷設枚数を増やすことで対応できるので，面積に比例する程度のコスト増で拡張可能である．

2.2 NaviGeta

前節の ID カーペット上でのユーザの位置を検出するウェアラブルなデバイスとして，図 6 に示す RFID リーダ組み込み履き物，NaviGeta を試作した [7]．アンテナ面が床面から 1 mm 程度の高さになるよう，両足の下駄の歯の間にそれぞれ 1 個ずつ取り付けられた RFID リーダにより，床の RFID タグを読み取る．

動作試験の結果，両足が接近すると二つの RFID リーダが干渉して読みとれない場合があることがわかった．図 7 に示すように，RFID リーダの横方向にも検出範囲があることが原因である．将来は，電磁シールドを施すなどして指向性を上げて，両足を揃えたときの干渉を無くしていきたい．また，下駄が接地している状態で，あらたな RFID タグが読み込まれない場合に，RFID リーダの動作を止めることで，干渉を減らす方法も考えられる．

図 7 に示した RFID 検出範囲の特性から，RFID タグ一つにつき，半径 20mm の範囲，約 13cm^2 の領域をカバーできることがわかる．900cm^2 のタイルカーペット一枚あたり 4 個の RFID タグを取りつけたので，試作した ID カーペット上を歩行すると，5.6%の確率で RFID の読みとり範囲に足を降ろすことになる．しかし実際には，RFID タグ検出可能距離以下の高さに，読みとり必要時間以上停留すれば，RFID タグを読みとることができるので，一歩あたりの検出確率はさらに高くなると期待できる．

予備実験として，6 名の 20 歳代男性が自然に歩行した様子を撮影し観察した結果，移動の約 50%以上にわたって，靴裏と床の高さが RFID タグの読みとり範囲に収まることがわかった．次に，実際に NaviGeta を装着した 10 名の被験者に ID カーペットの上を歩行してもらい，RFID タグの読みとり回数を測定した．本格的な試作に先立っての予備実験であったため，

表 1 100 歩あたりの RFID タグ検出回数 (hit) と読みとりエラー回数 (error)。

被験者	hit	error
40 歳代男性	34	9
20 歳代男性	37	18
20 歳代男性	29	2
20 歳代男性	39	6
20 歳代男性	56	8
20 歳代男性	42	6
20 歳代男性	54	21
20 歳代女性	32	1
20 歳代女性	37	3
20 歳代女性	41	7

使用した ID カーペットは 25 枚，床面の大きさ 1.5 x 1.5 m での実験となった．後日，64 枚の ID カーペットにより一部の被験者により再度実験を行ったが，結果はほぼ同様であった．床面積に制限があったためか，どの被験者も通常の活発な歩行に比べて，より摺り足に近い歩行を行ったことが観測された．ただし，家具等が多数設置されたオフィス環境を想定すれば，実際の歩行に近いデータであると考えている．

100 歩の歩行のうち RFID タグを読みとることができた回数（hit 回数）と，RFID タグの読みとりエラーが発生した回数（error 回数）を，表 1 に示す．読みとりエラーの原因は，RFID タグを発見することはできたが，読みとり距離内での十分な停滞時間が得られなかったこと，および，前述の RFID リーダ同士の干渉の二点が考えられる．前者の原因が引き起こすエラーに関しては，読みとり時間の高速な RFID タグを使用できれば，error 回数を hit 回数に取り込むことが可能であろう．

この結果から，歩数の 1/3 以上の頻度で RFID を読みとれる様子がわかる．ユーザが 2-3 歩歩けば，位置を特定することが可能であり，これは空気ペンのアプリケーションでは実用的な性能である．

RFID タグの読み落としを減らすために，RFID リーダは給電と読みとりを自動的に繰り返すモードで動作させた．RFID タグを読みとれた場合，その ID 番号から位置座標テーブルを検索して，人の立ち位置座標とする．ただし，左足から右足，もしくはその逆のように，二つの RFID リーダが交互に RFID タグを読みとった場合，人の重心がその中間にあると仮定して，人の立ち位置座標を二つの RFID タグの中間地点とした．

3 空気ペンの応用

空気ペンにより，実世界に手描きメモを仮想的に貼り付けて，他人と共有できるようになる．このことにより，以下のような利用例が考えられる．

たとえば，駅の伝言板のように，場所にメモ書きをして人にメッセージを伝えることができる．道案内や作業指示などにも利用できる．サーバに置いたメモ書きデータは，本物の伝言板の文字と違い，見せ方を任意にコントロールできる．たとえば仲間内だけに公開するメモ書きが可能である．これを応用すれば，見える人を限定できる仮想看板なども実現できる．必要な人だけに広告を出すことができれば，広告場所の有効利用になり，無秩序な看板で景観を損なうことが無くなるかもしれない．

駅などの伝言板への応用の際には，施設全体に RFID タグを敷設せず，待ち合わせ場所などに限定的に敷設することで設置コストを節減することが可能であろう．さらには床に印を刻印して利用者を誘導すれば，必要なタグをさらに減らすことができる．筆者らは実際の駅前広場の通路にタグを埋め込んだタイルを置き，これを踏んだ利用者に道順を提示することで，宝探しゲームをするデモを実施している．

前述のように，RFID タグが組み込まれた「情報建材」が普及すれば，公共施設やビルの中で空気ペンを利用することが現実的になるであろう．現在でも RFID タグが組み込まれた標識杭やマンホールが実用化されつつあるので，これらを利用して伝言板や道案内を提示することができる．またビル全体に RFID タグが埋め込まれれば，伝言やメモ書き以外に，状況を判断して様々な機能を実現するユビキタスコンピューティングとしての応用が可能になる．

電子的なメモ書きは，インターネット経由で遠隔地から削除したり変更する事も可能である．メモを訂正するために，書いた場所にもう一度出かける必要はな

いのである．インターネット経由で，複数の遠隔地に同時にメモ書きを行うことも可能である．道案内のために道路脇に順路を書き込むために，実際にその場に出かけなくとも，たとえばタブレット上の地図をなぞるだけで，実世界に矢印を書き込むことができるであろう．

空気ペンの仮想のメモ書きは，本物の持つ直感的なわかりやすさに加えて，コンピュータデータであることの魔法的な便利さを兼ね備えているといえる．空気ペンは，その名前のとおりペンを利用して空中にデータを作成することを第一の目的にしている．このアプリケーションの対象ユーザは，たとえばデスクワークで頻繁に見られるような「特定の誰かに記号的意味を伝達したい」というユーザではなく，未知の誰かに見てもらうことを期待してなにかを描きたいというユーザである．このようなユーザにとって，命題的意味を限定したアイコンだけを提供したり，あるいは活字を選択するインタフェースを提供するよりも，まずは描画の自由を提供するほうが自然であると考えた．

4 評価と今後の予定

一般的に，コミュニケーションそのものを評価することは難しい．学術的に妥当な心理実験を実施するためには充分に統制された環境が必要であるが，実験的に設定された試用経験だけに基づいて調査しても無意味なことが多い．そこで本報告では，本システムを体験してもらった多数のユーザから得られたフィードバックをもとに，コミュニケーションに気軽に利用できるウェアラブルデバイスに求められるインタフェースとしての要望について議論したい．透過型HMDの画質・透過特性・視野角，位置センサ，頭部方向センサなどの性能は既存の AR システムと比べると高いものではなかったが，その点についてのユーザの不満はほとんど聞かれなかった．一方で，空中に文字が書けることの面白さや可能性について評価された．

しかし，ジャイロセンサを使ったペンにより思い通りの描画を行うことは，初心者にとって困難であった．ジャイロの特性から，手首のひねりをつかって，レーザポインターで壁に字を書くような動作を行う必要がある．そのことを説明すると描画結果が向上した．小型のタブレット [4]，ビデオカメラなどによるペン先追跡の手法も検討すべきである．

描画したメモの内容，位置などを変更したり，削除する機能の要望も出された．しかし，ウェアラブルコンピュータの限定されたユーザインタフェースデバイスにより，複雑な編集作業を行うことはユーザにとって負担であろう．このような作業は，ネットワーク経由で遠隔地のデスクトップコンピュータから行う方法で実現したいと考えている．

ID カーペットと NaviGeta による位置検出結果は離散的ではあるが，人の移動によりメモ書きに対する視点が移動する様子を確認できた．ただし，RFID タグを読みとれない状態が続くと，視点の移動が無く，不自然な印象になる場面もあった．RFID タグの配置と密度について，最適化する必要がある．

本研究では一台のウェアラブルデバイスにより評価を行った．電子的な伝言板や道案内の応用では，ウェアラブルデバイスを複数の人が交代で付け替えることで評価が可能と考えた．ウェアラブルデバイスを身につけた複数のユーザが，情報を書きあい見せ合う場面での評価を行うために，今後複数のデバイスの作成を計画している．なお，サーバとクライアントのソフトウェアは現状で複数ユーザに対応している．

5 関連研究

場所に仮想的なメモ書きを貼り付けることで，携帯端末ユーザ同士のコミュニケーションを実現しようとするシステムに SpaceTag [10] がある．応用分野はほぼ同様であるが，本研究では場所へのメモ付け操作を，空中への書き込みという直感的なユーザインタフェースで提供することに重点を置いている．

カメラで撮影した画像をカード形式で実世界に貼り付ける AR システム [5] を使用すれば，仮想的な手描きメモを作成できる．本研究では，円滑なメモ描画操作の実現にはまだ課題が残るものの，紙への描画とカメラ撮影の操作を経ずに，空中への直接の描画を実現している．

床に敷設した RFID タグと靴に組み込んだ RFID リーダの組み合わせで，人の位置を検出する方式が，本研究と同時期に発表されている [9]．この研究が，

CG で構成された 3D 世界をウォークスルーする高精度な AR/VR システムの位置検出装置を目指して高密度に配置した RFID タグを使用しているのに対して，本研究では，コミュニケーションメディアとしての応用を目指して，少量の RFID タグにより安価で広範囲に展開できる位置検出システムを目指している．

[謝辞]

本研究は，新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)「新規産業創造型提案公募事業」の支援を受けた [8]．NEDO 事業の共同研究グループである株式会社アルゴクラフトには，ソフトウェア開発とデバイス外形設計を担当していただいた．

NaviGeta は，ソニーコンピュータサイエンス研究所の暦本純一氏が提案した架空の下駄型ナビゲーションシステムの名称であったものから，使用許諾いただいたものである．

参考文献

[1] Azuma, R. T.: A survey of augmented reality, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4 (1997), pp. 355-385. *http://www.cs.unc.edu/azuma/ARpresence.pdf*

[2] エーアイエムジャパン: これでわかったデータキャリア, オーム社 (1998).

[3] Feiner, S., MacIntyre, B., Hollerer, T. and Webster, T.: A touring machine: Prototyping 3D mobile augmented reality systems for exploring the urban environment, *Proc. ISWC '97 (First Int. Symp. on Wearable Computers)* (1997).

[4] Linderman, R., Sibert, J. and Hahn, J.: Towards Usable VR: An Empirical Study of User Interfaces for Immersive Virtual Environment, *Proc. CHI '99* (1999), pp. 64-71.

[5] 仲村 元亨, 大隈 隆史, 竹村 治雄, 横矢 直和: AR 環境におけるカード型情報管理システム第 13 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集 (1997), pp. 353-358.

[6] 椎尾一郎, 早坂達: モノに情報を貼りつける ー RFID タグとその応用ー, 情報処理, Vol. 40, No. 8 (1999), pp. 846-850.

[7] 椎尾一郎: RFID を利用したユーザ位置検出システム, 情報処理学会研究会報告, 00-HI-88 (2000), pp. 45-50.

[8] 椎尾一郎, 大脇正彦: 場所依存情報共有システムに関する研究平成 11 年度新規産業創造型提案公募事業成果報告会予稿集 (2000), pp. 228-233.

[9] 島田義弘, 志和新一, 石橋聡: 屋内二次元位置測定システム, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, A-16-5 (2000).

[10] 垂水浩幸, 森下健, 中尾恵, 上林弥彦: 時空間限定オブジェクトシステム:SpaceTag インタラクティブシステムとソフトウェア *VI (WISS98)* (1998), pp. 1-10.

[11] 山本吉伸, 椎尾一郎: 空気ペン ー空間への描画による情報共有ー, 第 59 回情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 4 (1999), pp. 39-40.