

NAIST-IS-MT0351004

修士論文

ウェアラブル拡張現実環境における ウェアラブルユーザへの注釈付加

穴吹 篤志

2005年2月3日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

穴吹 篤志

審査委員： 横矢 直和 教授
木戸出 正継 教授
山澤 一誠 助教授

ウェアラブル拡張現実環境における ウェアラブルユーザへの注釈付加*

穴吹 篤志

内容梗概

近年，計算機の小型化・高速化に伴い，コンピュータグラフィックスで描いた仮想物体を実環境に重畳表示する拡張現実感を利用して，任意の場所でユーザの眼前の実環境に注釈情報を重畳表示するウェアラブル注釈提示システムが注目されている．さらに，ユーザへ提示する注釈情報を無線ネットワークを介して通信可能な共有データベースで保持するネットワーク共有型注釈データベースも提案されている．しかし，従来のシステムは建物などの対象の存在する場所が変化しない物体への注釈付けを想定しており，環境中で位置が動的に変化する物体への注釈付けはできなかった．また，拡張現実環境内での複数ユーザの協調を支援するための研究は少なかった．

本論文では，環境中の自己位置の計測が可能な複数のウェアラブルコンピュータのユーザ（以下，ウェアラブルユーザ）の位置情報を無線ネットワークを介して，サーバ上の共有データベースで管理することで，静的な物体だけでなく環境内を動き回るウェアラブルユーザへの注釈付けが可能な注釈提示システムを提案する．提案システムは，注釈情報および注釈付けの対象であるウェアラブルユーザの位置情報を管理するサーバと，サーバからの情報を無線ネットワークを利用して獲得して注釈付加画像を生成・提示するクライアントシステムから構成される．本研究では，プロトタイプシステムを用いて，環境中の複数のユーザに対す

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0351004, 2005年2月3日.

る注釈付け実験を行い，拡張現実環境において複数ユーザ間の協調を支援するため基盤技術としての提案方式の有用性を検証する．

キーワード

ウェアラブルコンピュータ，拡張現実感，共有データベース，位置情報管理，注釈提示

Annotation of Personal Information on Wearable Users in a Wearable Augmented Reality Environment *

Atsushi Anabuki

Abstract

This paper describes an augmented reality (AR) system with wearable computers to annotate users using a networked shared database. With the advance of computers, wearable annotation overlay systems based on AR have received a great deal of attention. However, conventional systems can annotate only static objects such as buildings and there are few studies which aim at supporting collaboration among multiple AR users.

This paper proposes a new wearable annotation overlay system which can annotate not only static objects but also dynamic AR users. The proposed system provides wearable computer users with position and annotation information of other users via a wireless network. The proposed system consists of a server and client systems. The server manages position and annotation information of multiple AR users with a networked shared database. Client systems generates annotation overlay images based on position and annotation information received from the database. In experiments, the prototype system has been proven to correctly provide each user with annotations on other multiple users of wearable systems.

Keywords:

wearable computer, augmented reality, shared database, positional information management, annotation overlay

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0351004, February 3, 2005.

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究と本研究の位置付け	3
2.1 ウェアラブル拡張現実感システムに関する従来研究	3
2.1.1 ウェアラブル拡張現実感システム	3
2.1.2 ウェアラブル拡張現実感のためのネットワーク共有型注釈 情報データベース	9
2.2 ウェアラブルユーザの位置情報管理に関する従来研究	10
2.3 本研究の位置付けと方針	11
3. ウェアラブルユーザへの注釈付加	14
3.1 システムの設計方針	14
3.2 システムの処理の流れの概要	15
3.3 共有データベースサーバ	18
3.3.1 データベースの構造	19
3.4 クライアント	20
3.4.1 定点カメラシステム	20
3.4.2 ウェアラブルシステム	22
4. プロトタイプシステムを用いた注釈提示実験	26
4.1 プロトタイプシステムの機器構成	26
4.2 位置情報登録・取得に関する予備実験	27
4.3 クライアントシステムへの注釈提示実験	28
5. むすび	34
謝辞	35
参考文献	36

目次

1	天目らによるウェアラブル注釈提示システム [4]	2
2	プリンタのメンテナンス支援システム KARMA [13]	4
3	MIThril (MIT Media Lab) [15]	5
4	WIA (Wearable Internet Appliance) [16]	5
5	The Touring Machine [3]	7
6	ARQuake [29,30]	7
7	Weavy [24]	7
8	ウェアラブル注釈提示システム ARISE [5]	8
9	ウェアラブル注釈提示システム ARISE [5] におけるデータの流れ	8
10	共有データベースを用いたシステム [6] におけるデータの流れ . .	10
11	Sentient Computing Project [31]	12
12	ALTAIR [32]	12
13	AirLocation [33]	12
14	共有データベースを用いたウェアラブルユーザへの注釈付けシステム	16
15	サーバ・クライアント間の処理の流れ	17
16	定点カメラシステムにおけるデータの流れ	23
17	ウェアラブルシステムにおけるデータの流れ	25
18	ウェアラブル注釈提示システムの機器構成	27
19	位置情報の登録および取得に関する遅延	28
20	実験環境	29
21	環境中のユーザの位置と姿勢	29
22	状態 1 での注釈付加	31
23	状態 2 での注釈付加	32
24	状態 3 での注釈付加	33

表目次

1	ユーザ情報テーブル	21
2	位置情報テーブル	21
3	注釈情報テーブル	21

1. はじめに

近年，計算機の小型化・高性能化により，装着が可能なウェアラブルコンピュータの実現が可能になった [1]．また，実世界に仮想物体をシームレスに重ね合わせる技術である拡張現実感の研究もさかんに行われている [2]．拡張現実感をウェアラブルコンピュータ上で実現すれば，ユーザは任意の場所において，ユーザの位置に応じた情報をより直感的に獲得することができる．その応用例として，環境内への注釈付け，道案内や博物館のガイドなどが挙げられる [3,4]．

代表的なものとして，天目らは拡張現実感技術を利用して屋内外でユーザの位置および姿勢に応じて環境中の建物等のオブジェクトに対し注釈情報を重畳表示する，図1に示すようなウェアラブル注釈提示システムを提案した [5]．さらに牧田らは，ユーザに提示する注釈情報をネットワーク上の共有データベースで保持することで，リアルタイムに最新の注釈情報を複数のユーザに提供可能なネットワーク共有型注釈データベースの開発を行った [6]．牧田らの提案を契機に，ウェブブラウザを用いた注釈情報の更新インタフェースの共通化やセキュリティ問題の解決等，ウェアラブル注釈提示システムの環境は様々な側面で研究されるようになってきた [7]．

しかし，従来のシステムでは，建物等の静的なオブジェクトの注釈付けを想定しており，移動するオブジェクトに対する注釈付けは実現されていない．そこで本論文では，環境中の複数のウェアラブルコンピュータのユーザ（以下，ウェアラブルユーザ）間の協調を支援するために，環境中の自己位置が計測可能なウェアラブルユーザの位置情報をネットワーク上のデータベースで管理することで，動的なオブジェクトであるウェアラブルユーザに対して注釈付けを行うシステムを提案する [8,9]．提案システムは，注釈情報および注釈付けの対象であるウェアラブルユーザの位置情報を管理するネットワーク上のサーバと，サーバからの情報を無線ネットワークを利用して獲得するクライアントシステムから構成される．クライアントシステムとして，環境中の様子を定地点から撮影する定点カメラシステムと自己位置および姿勢の計測が可能なウェアラブル拡張現実感システム（以下，ウェアラブルシステム）を想定している．クライアントシステムは，それぞれサーバから取得した情報と自己位置および姿勢情報をもとに，カメラか

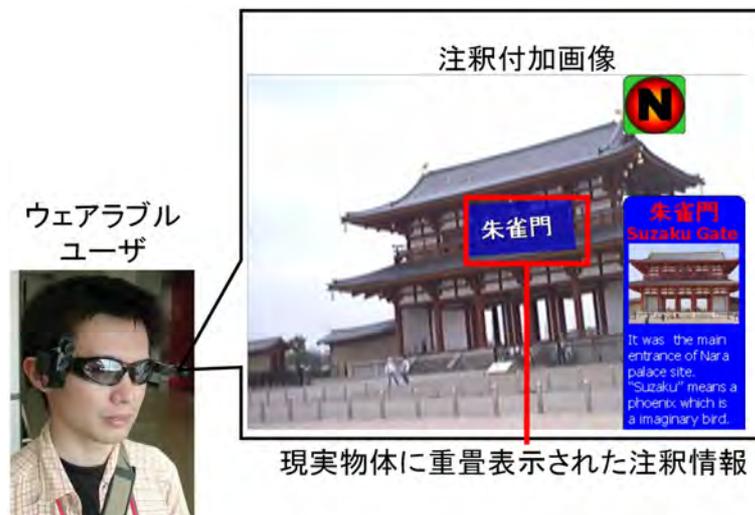


図1 天目らによるウェアラブル注釈提示システム [4]

ら得られるシーンの映像に対して注釈付けを行い，ユーザに提示する．

以下，2章ではウェアラブル拡張現実感システムと共有サーバを用いた環境中のウェアラブルユーザの位置情報管理に関する従来研究および本研究の位置づけについて，3章では拡張現実感を利用した環境中のウェアラブルユーザに対する注釈付加手法について，4章ではプロトタイプシステムを用いた注釈付け実験について述べる．最後に5章では本論文のまとめと今後の課題について述べる．

2. 関連研究と本研究の位置付け

本章では、本研究に関連する従来研究および本研究の位置付けについて述べる。2.1 節ではウェアラブル拡張現実感システムに関する従来研究について、2.2 節では共有データベースを用いた環境中のウェアラブルユーザの位置情報管理に関する従来研究について述べる。最後に、2.3 節では本研究の位置付けおよびシステムの構築方針について述べる。

2.1 ウェアラブル拡張現実感システムに関する従来研究

2.1.1 ウェアラブル拡張現実感システム

ウェアラブル拡張現実感とは、現実環境に仮想物体を重畳表示することで現実環境を拡張する拡張現実感技術をユーザが装着可能なウェアラブルコンピュータ上で実現したものである。以下に、拡張現実感とウェアラブルコンピュータについてそれぞれ述べる。

【拡張現実感】

拡張現実感とは、コンピュータグラフィックス（以下、CG）で描いた仮想物体をユーザの眼前の現実空間に重畳表示することにより、現実空間に情報を付加し、現実空間を拡張する技術である [2, 10, 11]。拡張現実感を利用することにより、作業者の支援のための指示や環境シミュレーションにおける建設前の建造物などの CG をユーザの眼前の映像に重畳表示できるため、これまでになく直感的な情報提示が可能になる [12]。図 2 は、Feiner らによって開発されたプリンタのメンテナンス支援システム KARMA [13] である。メンテナンスを行うユーザが装着した HMD 上に、次に行う作業の指示を描いた CG が拡張現実感技術によって直感的に提示される。このようにユーザの眼前の現実環境の正しい位置に CG で描いた仮想物体を重畳表示するためには、ユーザの視点の位置・姿勢を連続的に精度よく求め続ける必要がある。従来の拡張現実感システムの多くは、ワークステーションやデスクトップ PC 上で実現されていたため、ユーザが自由に動き回ることではできなかった。

【ウェアラブルコンピュータ】

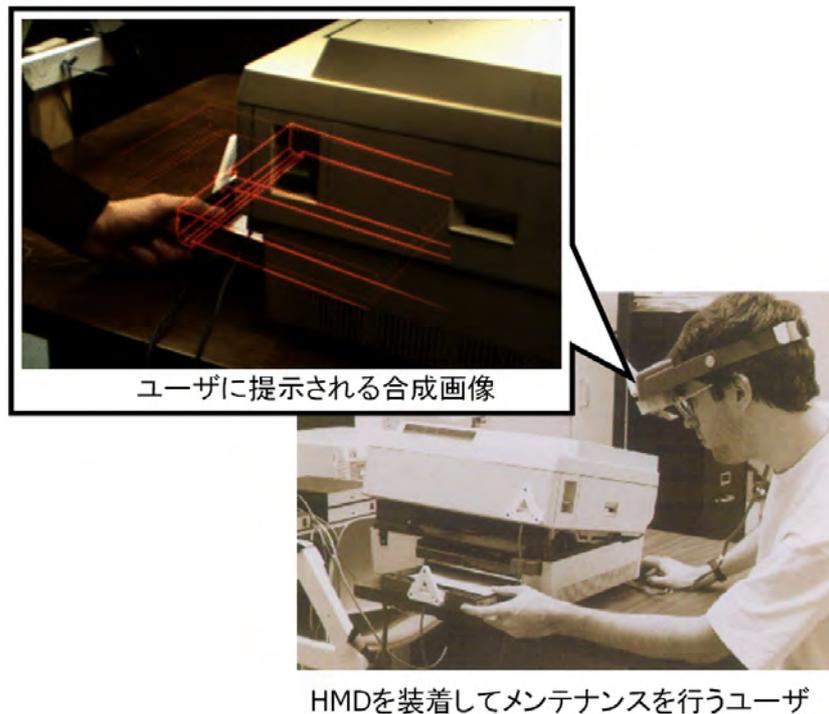


図2 プリンタのメンテナンス支援システム KARMA [13]

ウェアラブルコンピュータは、ユーザが身につけることが可能なコンピュータである。マサチューセッツ工科大学メディアラボ [14] によれば、使用時のみ電源を入れる PDA 等とは異なり、常時作動するものと定義されている。図3は、同大学のメディアラボが開発したウェアラブルコンピュータ MIThril [15] である。このように、コンピュータを装着したユーザが環境内を自由に動くことができるため、ウェアラブルコンピュータはユーザの位置に応じた情報を提供するのに適している。また、計算機の小型化、高性能化および無線ネットワークの発達に伴い、次世代の計算機としての期待も高まっている。図4に、日立製作所によって開発され、市販されているウェアラブルコンピュータ WIA (Wearable Internet Appliance) [16] を示す。この他にも、多種多様なウェアラブルコンピュータが開発されている [17-19]。

ウェアラブル拡張現実感システムとは、前述のウェアラブルコンピュータ上で動作する拡張現実感システムである。ウェアラブルコンピュータを用いることで



図 3 MIThril (MIT Media Lab) [15] 図 4 WIA(Wearable Internet Appliance) [16]

ユーザの動きや移動に制限がなくなり，自由に動き回れるユーザに対してCGで描かれた仮想物体が重畳表示された映像を提示することができる．このため，ウェアラブル拡張現実感システムは広範囲においてユーザの眼前の現実環境にユーザの位置に応じた情報を付加する技術として注目されている [3,4,20-28] ．

ウェアラブル拡張現実感システムでユーザの眼前の現実環境の正しい位置に仮想物体を重畳表示するためには，ユーザの位置および姿勢を連続的に精度よく計測する必要がある．これまで，ウェアラブル拡張現実感システムを実現するために，さまざまな位置および姿勢の計測手法が研究されてきた．従来，姿勢計測に関しては，ジャイロセンサが広く用いられている．一方，広範囲でのユーザ位置計測に関しては，いかに広範囲で精度よく計測を行うかが課題であり，現在もなお研究され続けている．以下に，これまでに提案されたユーザの位置計測手法およびそれらの手法を用いて開発されたウェアラブル拡張現実感システムの例を挙げる．

- GPS (Global Positioning System) を用いたシステム

図 5 はFeinerらによって開発されたウェアラブルユーザにキャンパス内の情報を提示するシステム Touring Machine [3] である．本システムは，屋外

での使用を想定しているため，GPS を用いてユーザの位置を計測する．

- GPS と画像マーカを用いたシステム

図6は，Thomasらによって開発されたウェアラブル拡張現実感を利用したエンターテインメントシステム ARQuake [29,30] である．本システムは，ウェアラブルコンピュータを装着したユーザは銃型の小型デバイスを持ち，環境内を移動しながらディスプレイ上に重畳表示されたモンスターを倒すゲームである．ユーザの位置計測に屋外環境ではGPS，屋内環境では画像マーカを用いる．複数の位置計測手法を組み合わせることにより，屋内および屋外の両方の環境に対応している．

- パノラマ画像群を用いたシステム

図7は，興相らによって提案されたヒューマンナビゲーションシステム Weavy [24] である．Weavyは，あらかじめ撮影されているパノラマ画像群と現在のユーザの視点からの画像のマッチングを行うことでビューベースな位置推定を行っている．

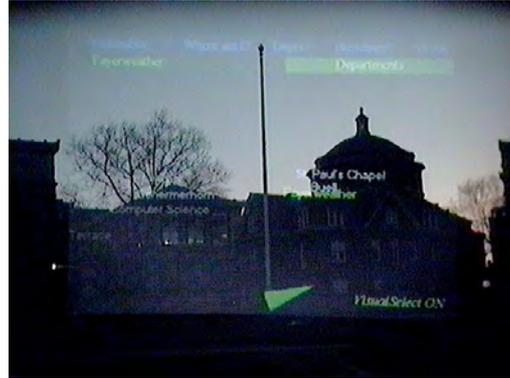
- 環境埋込み型センサと歩数計測を用いたシステム

図8は，天目らによって提案された注釈提示システム ARISE [5] である．ARISEでは，環境埋込み型センサと歩数計測を用いてユーザの位置を計測する．RFID タグと赤外線ビーコンという2つの環境埋込み型センサを組み合わせることによって，屋内および屋外の両方の環境に対応している．

屋内外の両環境において広範囲でのユーザ位置計測手法が提案されたことにより，環境中のオブジェクトへの注釈付け，エンターテインメント，ヒューマンナビゲーションなどさまざまな目的のウェアラブル拡張現実感システムが開発された．しかし，従来のウェアラブル拡張現実感システムでは環境内に多数のウェアラブルユーザが存在する状態を想定したものは少なく，初期のシステムではユーザに提示する情報をウェアラブルコンピュータが保持していた．図9は，天目らの提案したウェアラブル注釈提示システム ARISE におけるデータの流れを示す．本システムでは，ユーザの眼前の現実環境に重畳表示するCGオブジェクトである注釈



ユーザの外観



提示される注釈合成画像

図 5 The Touring Machine [3]



ユーザの外観

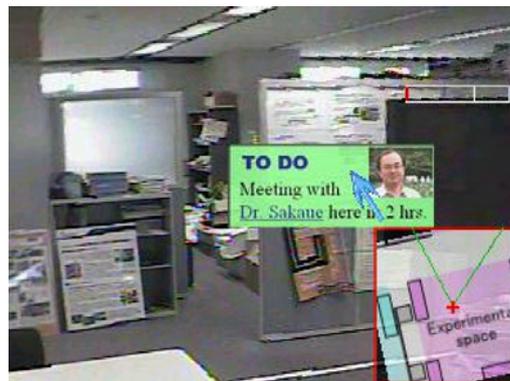


ユーザに提示されるゲーム画面

図 6 ARQuake [29,30]



屋外環境での注釈合成画像



屋内環境での注釈合成画像

図 7 Weavy [24]



屋外環境での注釈合成画像



屋内環境での注釈合成画像

図 8 ウェアラブル注釈提示システム ARISE [5]

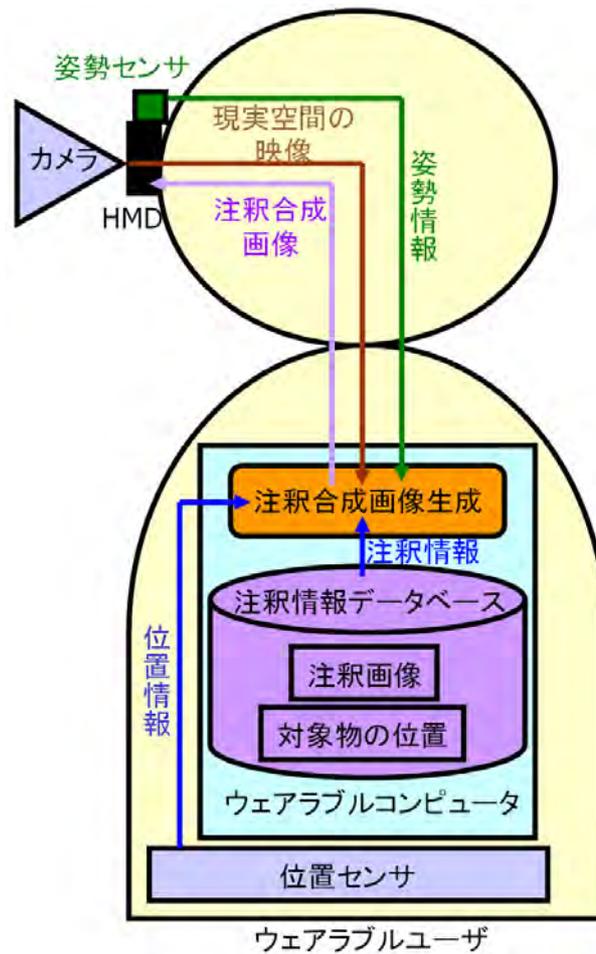


図 9 ウェアラブル注釈提示システム ARISE [5] におけるデータの流れ

画像と、注釈付けを行う対象物の位置からなる注釈情報データベースをウェアラブルコンピュータが保持していた。そのため、注釈の内容を更新する際に、ユーザがウェアラブルコンピュータの注釈情報データベースを更新しなければならなかった。また、環境内の状況変化に応じて即座に注釈データベースを更新することは困難であった。さらに、ウェアラブルコンピュータ内部に保存できるデータ量は限られているため、提示するためのデータを保持する範囲には制限があった。

2.1.2 ウェアラブル拡張現実感のためのネットワーク共有型注釈情報データベース

前述のように、現在では屋内外の広範囲な環境で安定して動作する多種多様なウェアラブルコンピュータが開発されている。しかし、従来のシステムの多くは各ウェアラブルコンピュータが注釈データベースを保持していたため、環境中のすべてのウェアラブルコンピュータに広い環境で最新の情報を即座に提供することは難しかった。

そこで、牧田らはウェアラブル拡張現実感システムのための無線ネットワークを利用したネットワーク共有型注釈データベースを提案した [6]。本システムでは、注釈情報を管理するサーバおよびウェアラブル拡張現実感技術を用いて注釈提示を行うウェアラブルシステムと注釈情報の作成・更新・削除を行う注釈情報提供システムの2種類のクライアントから構成される。図 10 に本システムにおけるデータの流れを示す。ネットワーク共有データベースを利用することにより、非常に広範囲な環境でウェアラブル注釈提示システムが利用できるようになったばかりでなく、環境内に存在するすべてのウェアラブルユーザに対して最新の注釈情報をリアルタイムに提供できるようになった。さらに、注釈情報の提供者が Web ブラウザを用いて簡単に注釈情報の作成・更新・削除が行える注釈情報提供システムを開発することにより、ウェアラブル注釈提示システムの利用範囲の拡大と利便性の向上に大きく寄与した。

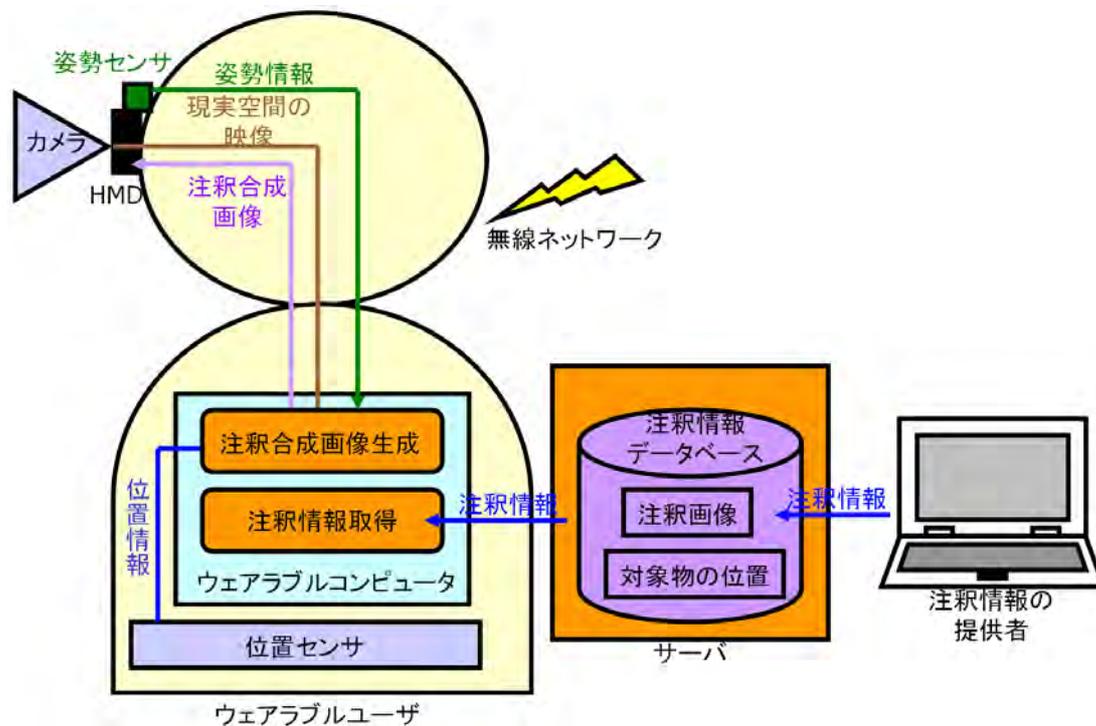


図 10 共有データベースを用いたシステム [6] におけるデータの流れ

2.2 ウェアラブルユーザの位置情報管理に関する従来研究

環境内に存在する各ユーザの位置および各ユーザが何をしているかといった状態を取得することによってユーザ間の協調支援を行う研究が行われている。以下に、ユーザの位置情報管理に関する研究例を挙げる。

- Sentient Computing Project [31]

AT&T の Sentient Computing Project [31] では、超音波発信器と超音波センサを用いてユーザの位置同定を行い、ユーザの位置情報を利用したアプリケーションを提供した。本研究では、図 11(a) に示す超音波発信器 Bat を装着したユーザの位置を超音波センサを用いて計測する Active Bat System を核にしており、図 11(b) は計測したユーザの位置を地図上にプロットしたものである。

- ALTAIR [32]

坂田らはアクティブ IR タグを用いた複数ユーザ位置同定システム ALTAIR を提案した [32]。ALTAIR では、アクティブ IR タグと広角赤外カメラを用いてユーザの識別および位置同定を行い、サーバ上で環境内のすべてのユーザの位置を管理する。そして、図 12 に示すようにユーザのいる環境の 3 次元モデル上の各ユーザがいる位置にそれぞれのユーザを示す CG オブジェクト表示することにより、環境中のユーザの位置を提示する。

- AirLocation [33]

日立製作所は、無線 LAN の信号を用いてユーザの位置を計測し、計測した位置をサーバ上で管理するシステム AirLocation [33] を開発し、市販している。AirLocation では、5 台の無線 LAN アクセスポイントと無線 LAN 端末の間を伝播する無線 LAN 信号を利用して三角測量を行うことにより、ユーザの位置を計測する。

しかし、これらのシステムは拡張現実環境に適用するにはセンサの設置コストや位置計測の空間分解能および時間分解能に問題があるため、広域環境においてユーザの眼前に存在するユーザに対して直感的に情報を付加することはできなかった。

2.3 本研究の位置付けと方針

前述の通り、ユーザの眼前の環境に CG で描かれた情報を重畳表示することにより直感的な情報提示が行える拡張現実感技術をユーザが装着することができるウェアラブルコンピュータ上で実現したウェアラブル拡張現実感システムに関する研究が盛んに行われている。さらに、このようなウェアラブル拡張現実感環境の進展に伴い、ウェアラブル拡張現実感システムのための共有データベースやウェアラブル拡張現実感システム開発用ライブラリなど、ウェアラブル拡張現実感システムの利用シーンを広げるための研究がさまざまな側面から行われるようになった。また、ウェアラブル拡張現実感システムとは独立して環境中のユーザの位置をサーバ上で管理することにより、ユーザ間の協調支援を行うシステムも開発さ



(a) Bat

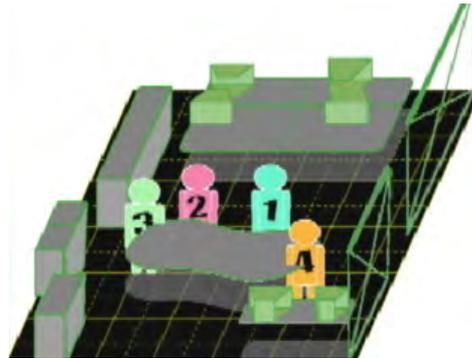


(b) ユーザの位置が描画された地図

図 11 Sentient Computing Project [31]



(a) 実験環境



(b) サーバ上の位置情報を視覚化した画像

図 12 ALTAIR [32]

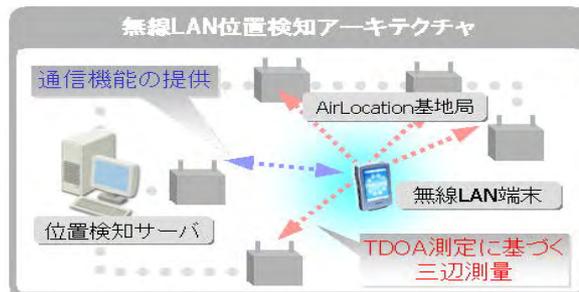


図 13 AirLocation [33]

れている。しかし、これまでのシステムでは環境内を移動するオブジェクトへの注釈付けは実現されていない。

そこで、本論文では、ネットワーク共有データベースを用いて環境中のウェアラブルユーザの位置情報を管理し、拡張現実感技術を用いて環境中のユーザに対して注釈付加を行うシステムを提案する。本研究では、注釈を提示する拡張現実環境として、ウェアラブルユーザと定点カメラを想定し、システムの構築を行う。

3. ウェアラブルユーザへの注釈付加

本章では，サーバが共有データベースを用いて環境中のウェアラブルユーザの位置情報を管理することによって，動的なオブジェクトであるウェアラブルユーザへ注釈を付加する拡張現実感システムについて述べる．3.1 節ではシステムの設計方針について，3.2 節では処理の流れについて述べる．3.3 節ではサーバでの処理について，3.4 節ではクライアントでの処理についてそれぞれ説明する．

3.1 システムの設計方針

環境中のウェアラブルユーザへの注釈付加を行うためには，カメラ位置，姿勢および環境中の注釈付けの対象となるウェアラブルユーザの位置が必要となる．自己位置および姿勢の計測に関しては，前述のようにこれまでにさまざまな計測手法が提案され，屋内外の広域環境での高精度な計測が実現されている．したがって，環境中の他のウェアラブルコンピュータの位置を取得できれば，ウェアラブルユーザへの注釈付けを行う拡張現実感システムを実現できる．そこで，本研究では環境中のウェアラブルコンピュータが通信可能なネットワーク上に環境中のウェアラブルユーザの位置を管理するサーバを用意する．また，本研究ではサーバが管理する位置情報を用いて環境中のウェアラブルユーザに対して注釈付けを行うクライアントシステムとして，環境中に設置されたカメラの映像に注釈を合成する定点カメラシステムとウェアラブルコンピュータを装着したユーザに注釈付加画像を提示するウェアラブルシステムの2種類のシステムを想定する．

本研究では，環境中で計測されたウェアラブルユーザの位置情報を用いて環境中のウェアラブルユーザに注釈付加を行う注釈提示システムを提案する．提案システムでは，クライアントシステムがネットワークを介してサーバに接続可能で，注釈付けの対象となるウェアラブルユーザは，センサを用いて自己位置の計測が可能である環境を想定する．その際，各ウェアラブルユーザは計測精度，時間分解能および空間分解能の異なるさまざまな手法で自己位置の計測を行うものとする．また，サーバは共有データベースを用いて環境内のクライアントシステムのユーザを認証し，クライアントシステムが環境中のウェアラブルユーザに対して

注釈を付加する際に必要な情報を管理する．このようにサーバが情報を管理することにより，クライアントシステムのユーザが閲覧する権利を持つ情報のみを提示できるほか，クライアントシステムに対して常に最新の情報を提供することができる．これらの情報は個人的な情報であるため，共有データベースはセキュリティやプライバシーに十分に配慮して設計する必要がある．提案システムでは，これらの問題を考慮した牧田らの注釈情報データベース [6] の基本設計を位置情報管理データベースに適用することで，セキュリティやプライバシーなどの問題に対処する．

3.2 システムの処理の流れの概要

共有データベースを用いてウェアラブルユーザへの注釈付けを行う拡張現実感システムの概要を図 14 に示す．提案システムは，共有データベースを用いて情報を管理するサーバと，センサおよびサーバから取得した情報を用いて注釈付加を行う定点カメラシステム，ウェアラブルシステムの 2 種類のクライアントから構成される．以下ではシステム全体の処理概要を述べ，サーバについては 3.3 節で，定点カメラシステムおよびウェアラブルシステムの 2 種類のクライアントシステムについては 3.4 節で詳述する．

図 15 に提案システムのサーバ・クライアント間の処理の流れを示す．処理は，ユーザ認証，注釈情報取得，位置情報取得・送信，注釈合成画像生成，注釈情報更新の 5 種類のプロセスから構成され，それぞれ図 15 (A)，(B)，(C)，(D)，(E) に対応する．提案システムでは，無線ネットワークの電波強度悪化などによる遅延が他の処理に影響するのを防ぐために (C)，(D)，(E) の 3 つのプロセスを非同期で行う．以下で，それぞれのプロセスについて述べる．

(A) ユーザ認証

ユーザ認証は以下の手順で行う．

1. 認証画面表示

定点カメラシステムが起動したときおよびウェアラブルシステムが想定環境内に進入したときにクライアント側に認証画面を表示する．

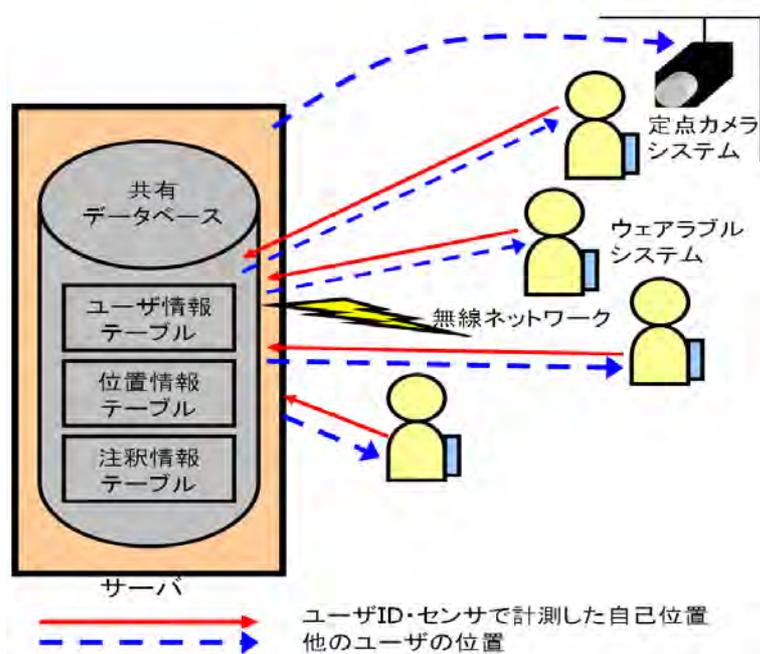


図 14 共有データベースを用いたウェアラブルユーザへの注釈付けシステム

2. ID・パスワード入力

クライアントシステムのユーザが入力したユーザID，パスワードをサーバに送信する．

3. ユーザ情報テーブルのID・パスワードを参照

サーバは，クライアントから受信したIDをキーとして，表1に示すユーザ情報テーブルを検索し，そのユーザのパスワードを参照する．

4. ID・パスワードの照合

クライアントシステムから受信したID・パスワードとユーザ情報テーブルを参照して取得したID・パスワードを照合することにより，ユーザを認証する．

(B) 注釈情報取得

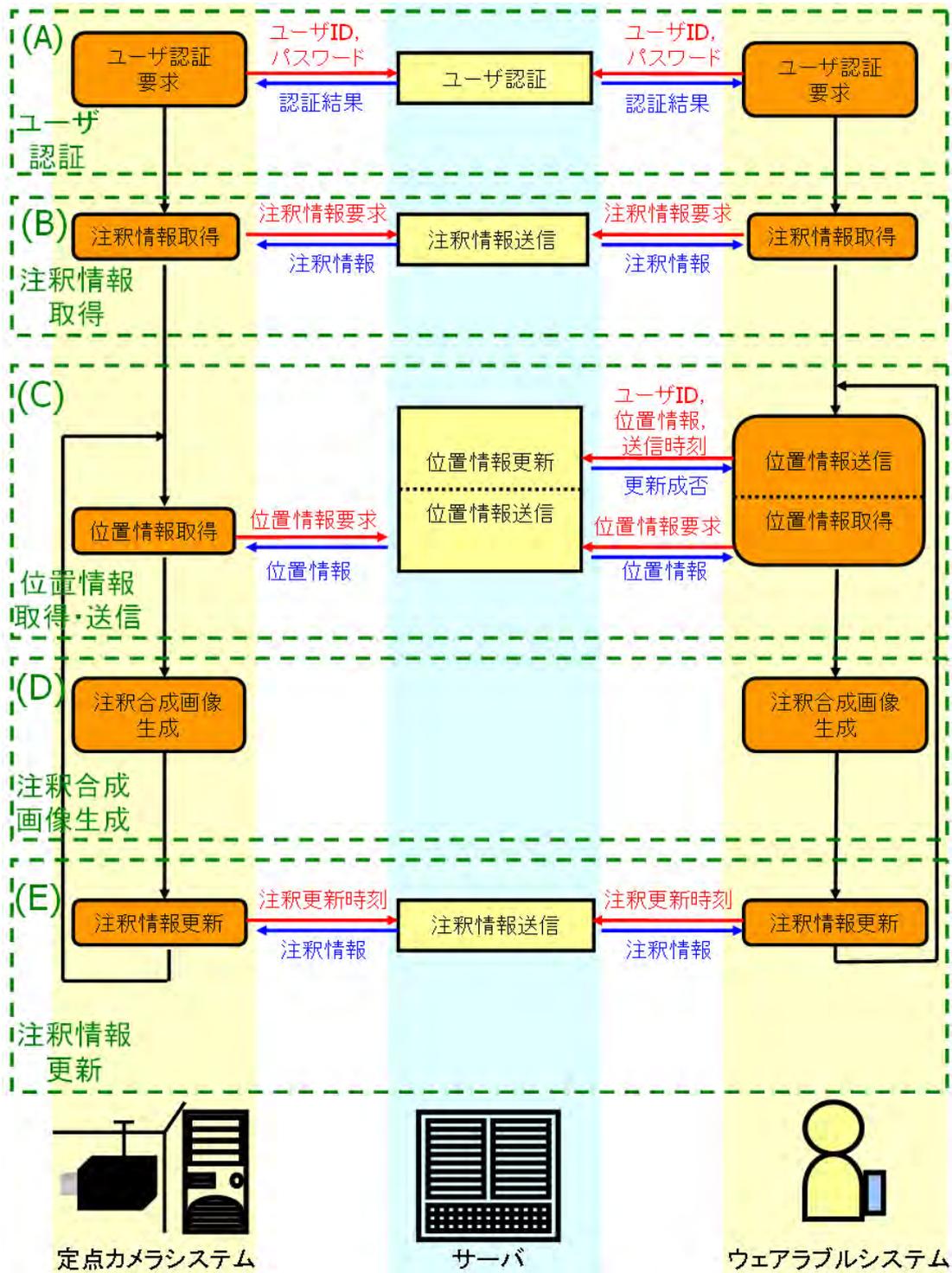


図 15 サーバ・クライアント間の処理の流れ

サーバによって認証されたクライアントは，サーバに注釈情報を要求する．要求を受けたサーバは，環境中のユーザに関する注釈情報をクライアントに送信する．また，注釈情報の再取得が必要になったときに，クライアントシステムは自動的にサーバから注釈情報の内容を取得する．

(C) 位置情報の取得・送信

ウェアラブルシステムは，位置センサにより計測された各ユーザの位置情報を，ユーザID，データの計測時刻と共にサーバに送信し，サーバは送信された位置情報をもと後述の位置情報テーブルを更新する．

環境中のウェアラブルシステムおよび，定点カメラシステムは共有データベース内の表2で示す位置情報テーブルから環境中のユーザの位置情報を取得する．

(D) 注釈合成画像生成

クライアントシステムは，センサなどを用いて計測した自己位置，姿勢およびサーバから取得した注釈情報と他のユーザの位置情報をもとに拡張現実感技術を用いて注釈合成画像を生成し，ユーザに提示する．注釈合成画像の生成手法については，3.4節で詳述する．

(E) 注釈情報更新

注釈合成画像生成後，クライアントはサーバに後述の注釈情報テーブルが更新された時刻を問い合わせる．その結果，注釈情報を取得した後に注釈情報テーブルが更新されていた場合，クライアントは更新された注釈情報を取得し，クライアント内部で保持している注釈情報を更新する．

3.3 共有データベースサーバ

3.2節で述べたように，サーバはクライアントからの要求に応じてユーザ認証，注釈情報送信，位置情報更新，位置情報送信，注釈更新時刻送信の各処理を行う．以下に，本システムで用いたこれらの処理で用いるデータベースの構造を詳述する．

3.3.1 データベースの構造

共有データベースは、表 1、表 2、表 3 に示すユーザ情報テーブル、位置情報テーブル、注釈情報テーブルから構成される。以下に、各テーブルについて述べる。

【ユーザ情報テーブル】

ユーザ情報テーブルは、ユーザの認証およびセキュリティに用いる。ユーザ情報テーブルの構成およびデータの例を表 1 に示す。以下に、ユーザ情報に関する各データについて述べる。

- ユーザ ID：本システムを使用するクライアントユーザの ID。環境中のユーザを識別するために用いる。
- パスワード：環境内に新たに出現したユーザを認証するために用いる。セキュリティを考慮し、暗号化してデータベースに記録する。
- 所属グループ：各ユーザが所属するグループ。
- マシン情報：各クライアントが使用している計算機の情報。各クライアントマシンの性能にあった情報を送信するために用いる。

【位置情報テーブル】

位置情報テーブルは、環境中のすべてのウェアラブルユーザの位置を管理するのに用いる。位置情報テーブルの構成およびデータ例を表 2 に示し、以下にテーブル内の各データについて述べる。なお、ユーザ ID に関しては、すでに述べたため省略する。

- X, Y, Z：現実環境におけるウェアラブルユーザの 3 次元位置。
- 更新時刻：各ウェアラブルユーザの位置情報が更新された時刻を記録する。

【注釈情報テーブル】

注釈情報テーブルは、ウェアラブルシステムおよび定点カメラシステムが拡張現実感技術を用いて環境中のウェアラブルユーザに付加する注釈を管理する。

注釈情報テーブルの構成およびデータ例を表3に示し、以下にテーブル内の各データについて述べる。なお、ユーザIDに関しては、既に述べたため省略する。

- 注釈ID：各ウェアラブルユーザに付加する注釈を識別するために用いる。
- 名称：注釈として提示するオブジェクトの名称。位置情報テーブル内の位置情報を用いてユーザの眼前のシーンに重畳表示される。
- 閲覧可能者：各ユーザの注釈を閲覧できるユーザもしくはグループ。

閲覧可能者の項目に、各ウェアラブルユーザが自分自身に関する注釈を閲覧可能なユーザまたはグループを指定することにより、許可されたユーザのみが注釈情報を閲覧可能になり、環境中のウェアラブルユーザのプライバシーを保護できる。

3.4 クライアント

以下に、提案システムで想定している定点カメラシステムとウェアラブルシステムの2種類のクライアントシステムについて詳述する。

3.4.1 定点カメラシステム

定点カメラシステムは、監視カメラなどのセキュリティサポートなどへの応用を想定したものである。以下に、定点カメラシステムの機器構成および処理内容を詳述する。

【機器構成】

定点カメラシステムは、広角撮影可能なビデオカメラ、ネットワークに接続可能なPCおよびディスプレイから構成される。

- ビデオカメラ：現実環境の映像を取得する。
- PC：サーバから取得した環境中のウェアラブルユーザの位置情報および注釈情報をもとに現実環境に注釈情報を重畳表示する。

表 1 ユーザ情報テーブル

ユーザ ID	パスワード	所属グループ	マシン情報
USER A	*****	GROUP A	Wearable PC X
USER B	*****		Wearable PC Y
USER C	*****	GROUP F	Wearable PC Z

表 2 位置情報テーブル

ユーザ ID	X	Y	Z	更新時刻
USER A	1000	1500	-1000	2005-01-25 13:00:00:349
USER B	2000	1500	930	2005-01-25 13:00:00:338
USER C	4000	1500	600	2005-01-25 13:00:00:351

表 3 注釈情報テーブル

注釈 ID	ユーザ ID	名称	閲覧可能者
ANO101	USER A	YAMADA	USER C
ANO202	USER B	SUZUKI	GROUP B
ANO211	USER C	TANAKA	EVERYONE

- ディスプレイ：合成された注釈付加画像を表示する。

また，定点カメラの位置および姿勢は既知であり固定されているものとする。

【処理内容】

定点カメラシステムでは，図 16 に示すように，サーバから取得したウェアラブルユーザの位置および注釈情報を用いてカメラで撮影した画像上に注釈を合成する。

定点カメラシステムにおける処理の概要は，3.2 節で述べたため，ここでは，定点カメラシステムにおける注釈合成画像の生成手法について述べる。注釈合成画像の生成には，天目らの手法 [5] を用いる。まず，あらかじめ与えられている定点カメラの位置および姿勢とサーバから取得したウェアラブルユーザの位置から注釈を重畳表示する場所を決定し，透視投影法を用いて注釈を重畳表示する。

3.4.2 ウェアラブルシステム

ウェアラブルシステムは，環境中のユーザ間のコミュニケーションや協調作業を想定したものである。以下に，ウェアラブルシステムの機器構成および処理内容を詳述する。

【機器構成】

ウェアラブルシステムは，位置・姿勢センサ，カメラ，および無線ネットワークに接続可能なノート PC，表示デバイスから構成される。

- 位置センサ：環境中のユーザの位置を計測する。
- 姿勢センサ：ユーザの頭部に装着し，環境中のユーザの頭部の姿勢を計測する。
- カメラ：ユーザの頭部に装着し，ユーザの視線方向の現実環境を撮影する。
- ノート PC：位置センサを用いて計測した自己位置をサーバへ送信する。また，サーバからの環境中の他のウェアラブルユーザの位置情報および注釈情報を取得し，現実環境への注釈情報の合成処理を行う。

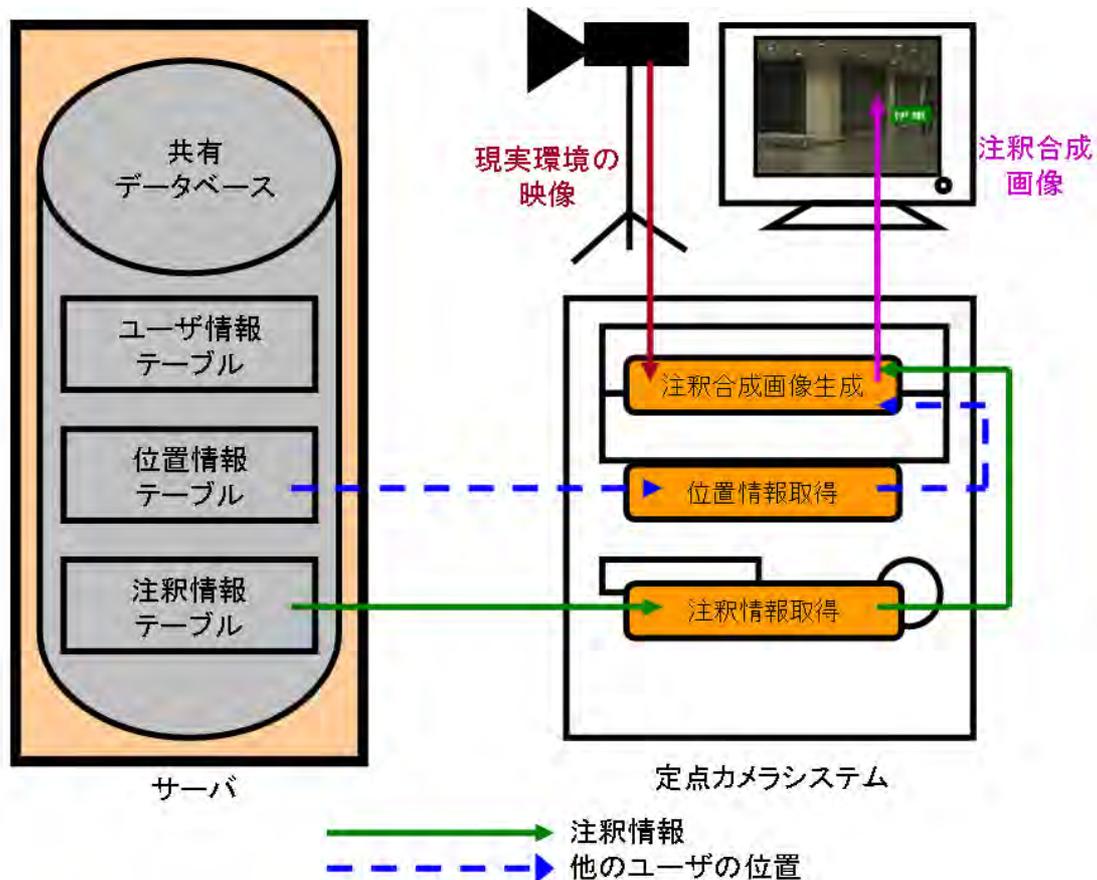


図 16 定点カメラシステムにおけるデータの流れ

- 表示デバイス：小型のビデオスルー型ディスプレイであり，注釈合成画像を表示する．

ウェアラブルユーザはこれらの機器を装着して環境内を自由に歩き回る．

【処理内容】

ウェアラブルシステムでは，図 17 に示すように，姿勢センサを用いて計測した自己位置，姿勢およびサーバから取得した他のユーザの位置，注釈情報を用いてカメラで撮影した現実空間の映像に注釈を合成する．ウェアラブルシステムにおける処理の概要は 3.2 節で述べた通りである．ここでは，ウェアラブルシステムにおける注釈合成画像の生成手法について述べる．

ウェアラブルシステムでも，定点カメラシステムと同様の手法を用いて注釈

合成画像を生成する。ただし、ウェアラブルユーザは環境内を自由に歩き回るため、注釈付加画像生成の際に位置センサ、姿勢センサを用いて計測した自己位置、姿勢を用いる。また、ウェアラブルシステムは視野内のユーザへの直感的な注釈提示を目的としているため、ユーザが目視できないほど離れている他のユーザに対する注釈は表示しない。

提案手法を用いることにより、環境中の各ウェアラブルシステムが計測した自己位置情報を用いて他のウェアラブルユーザに対する注釈付加が可能になる。そのため、人が密集した環境での協調作業などで特に有効である。

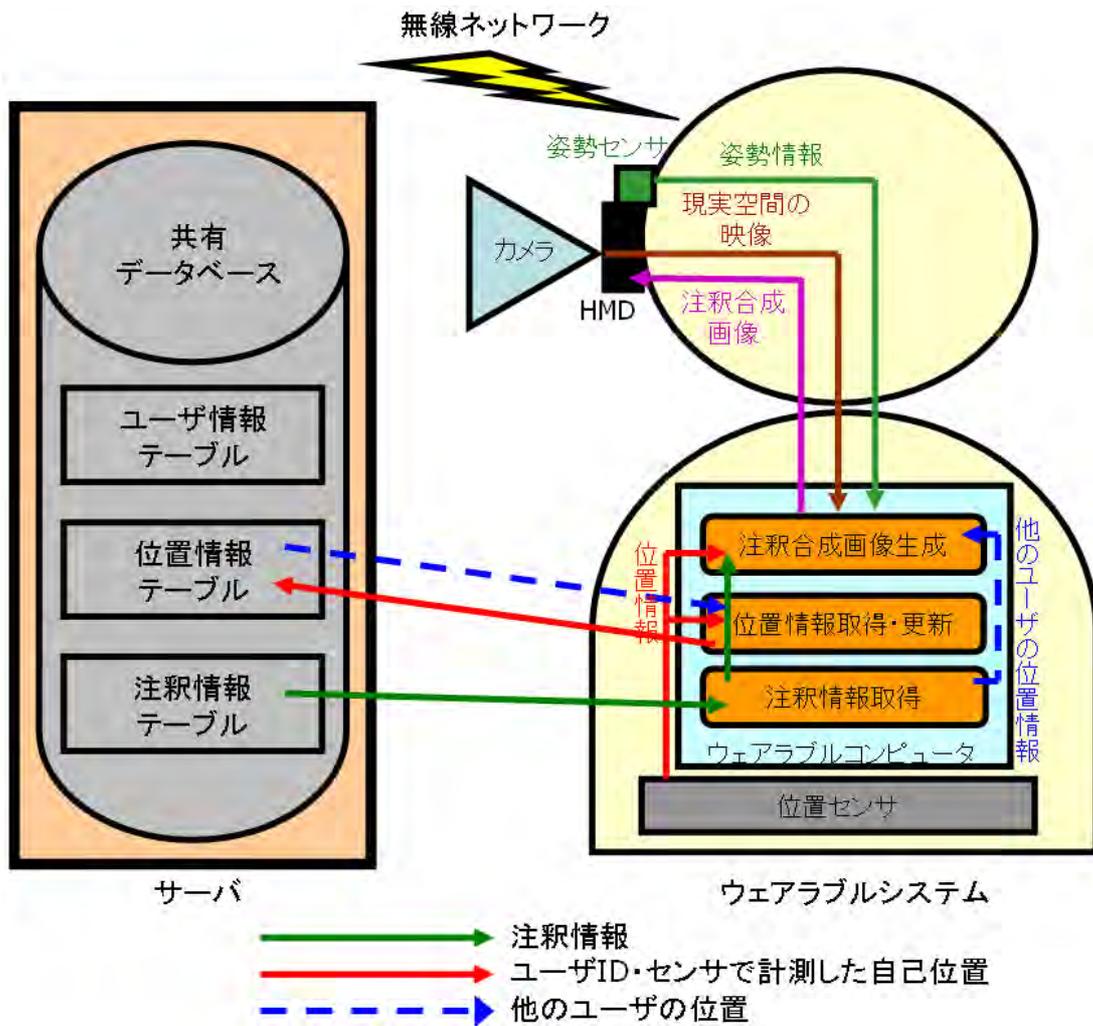


図 17 ウェアラブルシステムにおけるデータの流れ

4. プロトタイプシステムを用いた注釈提示実験

提案手法を用いてプロトタイプシステムを構築し，本学屋内での注釈付け実験を行った．以下，4.1 節では，プロトタイプシステムの機器構成について，4.2 節では，位置情報登録・取得にかかる時間遅延とその影響に関する予備実験について述べる．最後に，4.3 節では，定点カメラおよびウェアラブルユーザの視点カメラからの映像に環境内のウェアラブルユーザに対する注釈情報を重畳表示する実験について述べる．

4.1 プロトタイプシステムの機器構成

プロトタイプシステムは，データベースを格納するサーバおよび定点カメラシステム，ウェアラブルシステムの2種類のクライアントから構成される．図18に，本実験で使用したウェアラブル型注釈提示システムの機器構成の概要を示す．ただし，後述のユーザB，ユーザCは慣性航法モジュールを装着していない．また，以下にサーバと定点カメラシステムの機器構成について述べる．

- サーバ
 - PC：CPU Pentium 4 2.0GHz, メモリ 512MB, 有線 LAN で学内ネットワークに接続可能
- 定点カメラシステム
 - ノート PC：Inspiron 9200 (DELL), CPU Pentium M 2.1GHz, メモリ 2GB, 無線 LAN 接続可能
 - ビデオカメラ：DSR-PD150 (SONY), 有効画素数 720 × 480, ワイドコンバージョンレンズ VCL-HG0758 (SONY) 装着
 - カメラの位置・姿勢はあらかじめ計測

プロトタイプシステムでは，サーバとクライアント間は IEEE802.11b の無線 LAN で通信可能である．クライアントシステムは天目らの手法 [5] を用いて，カ

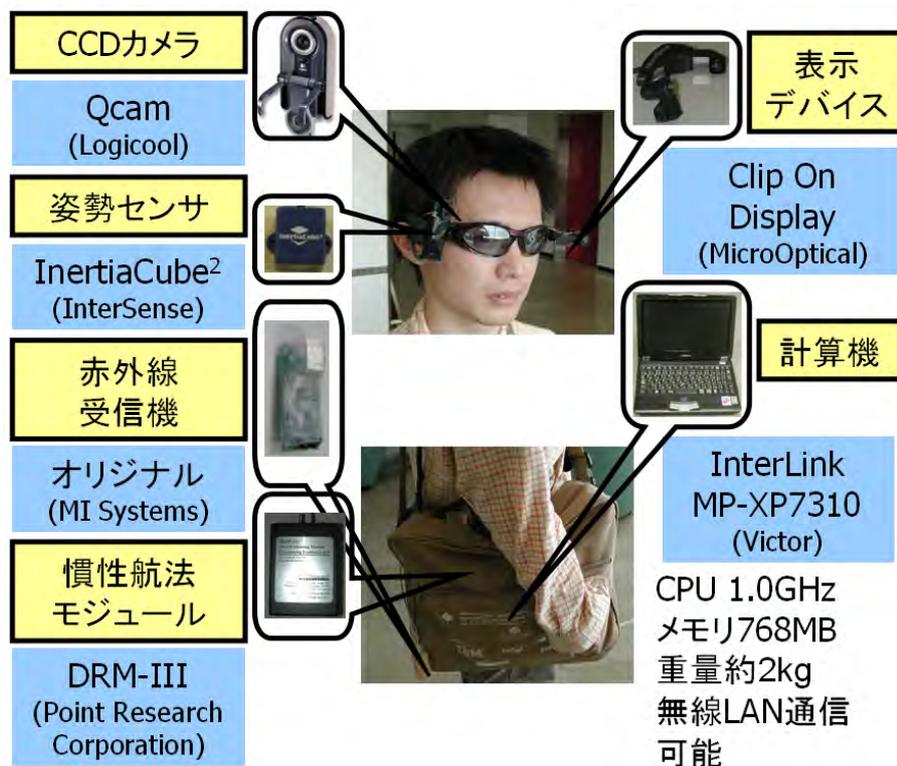


図 18 ウェアラブル注射提示システムの機器構成

メラから得られる映像に環境内のウェアラブルユーザに関する注射情報を重畳表示してユーザに提示する。その際、定点カメラシステムではあらかじめ計測しておいたカメラ位置・姿勢，ウェアラブルシステムではセンサを用いて実時間計測したユーザ位置・姿勢に基づいてそれぞれ注射情報をビデオ合成する。

4.2 位置情報登録・取得に関する予備実験

無線 LAN を利用したサーバへの位置情報の登録およびサーバからの取得にかかる時間遅延が注射提示に与える影響を調べるための予備実験を行った。本実験では、環境内の 8 台のクライアントがタイムスタンプ付きの位置情報をサーバに登録し、各クライアントは環境中の全てのユーザの位置情報を取得した。このとき、各クライアントが位置情報をセンサで計測してから、サーバを介して計測された自己位置情報を取得するまでの時間を位置情報登録および取得に関する時間

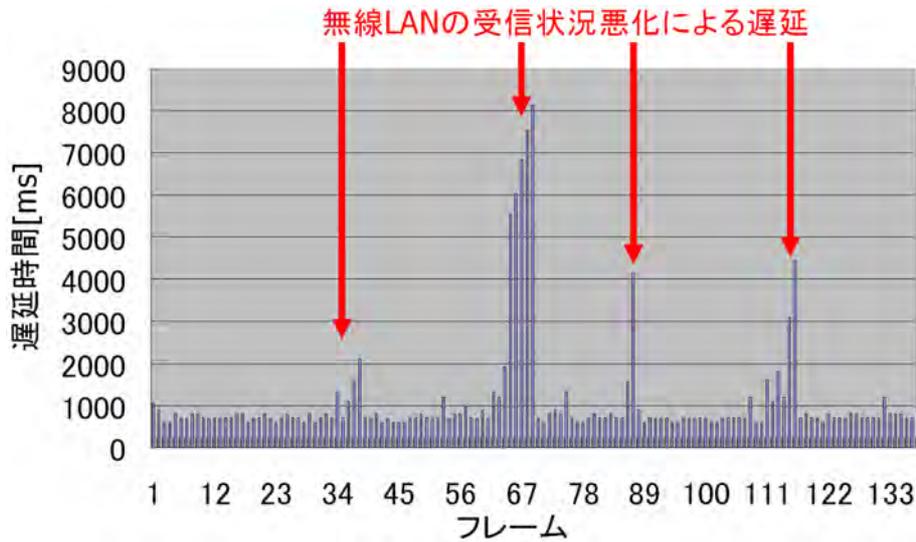


図 19 位置情報の登録および取得に関する遅延

遅延と定義し計測を行った．図 19 にその結果を示す．本実験の結果より，一時的な無線 LAN の受信状態の悪化による遅延の増大が見られるものの，ほとんどの場合遅延は平均 900ms 程度である．この間にユーザは 1m 程度の歩行が可能であることから，位置情報の登録および取得にかかる時間遅延による注釈情報の位置ずれは最大で 1m 程度となる．本研究は，注釈合成画像をもとにクライアントシステムのユーザが環境中のウェアラブルユーザを識別可能であることを目的としているため，これは本研究で想定する環境での注釈付加には大きな影響を与えるものではないと考えられる．

4.3 クライアントシステムへの注釈提示実験

次に，無線 LAN が利用可能な本学屋内環境で定点カメラシステムおよびウェアラブルシステムを用いた注釈提示実験を行った．図 20 に実験環境の様子を示す．実験では，A，B，C の各ウェアラブルユーザは図 20 中の青，赤，緑の矢印に沿って移動した．また，環境中のウェアラブルユーザと定点カメラの位置関係およびユーザの姿勢が図 21(a)，(b)，(c) の状態のときをそれぞれ状態 1，状態 2，状態 3 とする．本実験では，各ユーザは環境内を歩行し，図 20，図 21 のユーザ

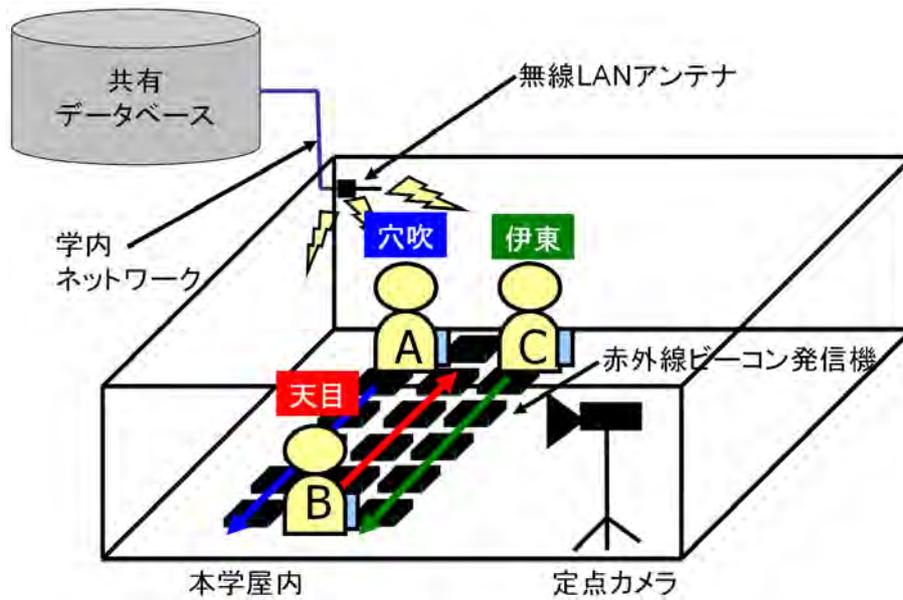


図 20 実験環境

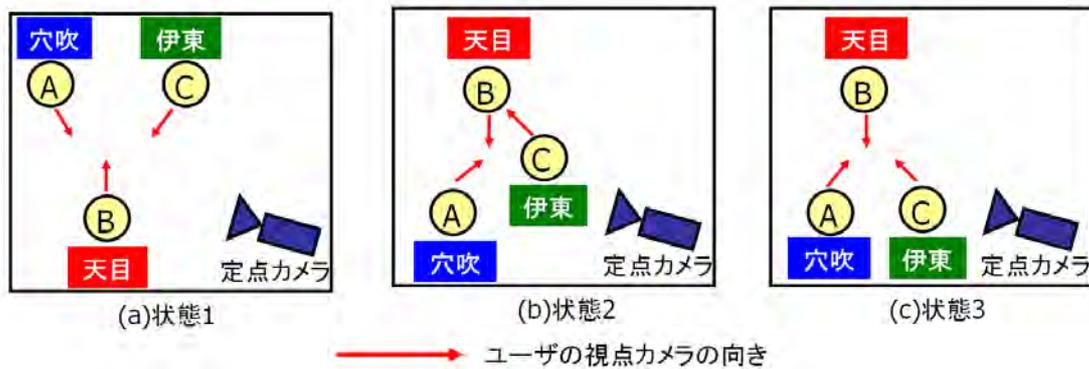
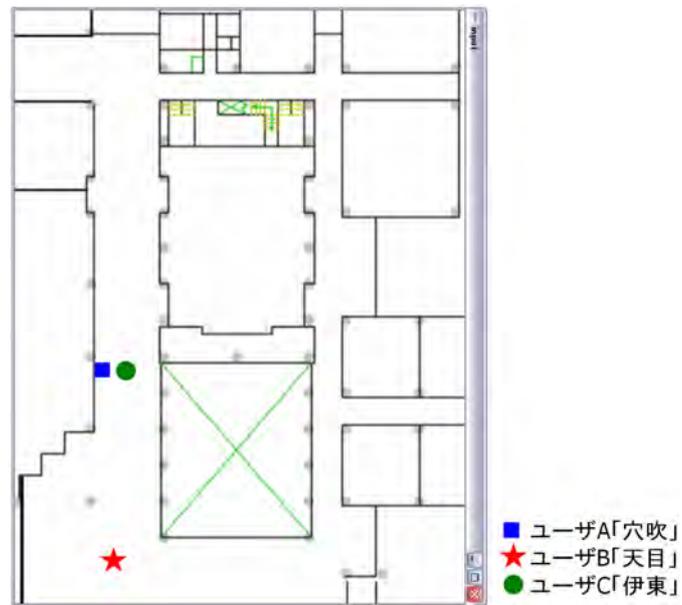


図 21 環境中のユーザの位置と姿勢

Aに「穴吹」、ユーザBに「天目」、ユーザCに「伊東」という注釈を付加した。

図22(a)は、図21の状態1でのサーバ内のウェアラブルユーザの位置を実験環境の地図上にプロットしたものである。図22(a)より、サーバが環境内のウェアラブルユーザの位置を正しく管理できることを確認した。図22(b)、(c)、(d)、(e)は、図21の状態1で定点カメラシステムおよび、ユーザA、ユーザB、ユーザCのウェアラブルシステムで生成された注釈付加画像を示す。図22(b)の例では環境中のユーザA、B、Cに対して正しく注釈付けできることが確認できる。また、図22(c)では、環境中のユーザBに、図22(d)では、環境中のユーザA、Cに、図22(e)では、環境中のユーザBに対して正しく注釈付けされており、環境中を移動するウェアラブルコンピュータのユーザに対しても直感的に他のユーザの位置を示すことができることを確認した。さらに、異なる環境で行った実験においても、図23、図24に示すように、ユーザの位置に注釈が重畳表示されていることから、サーバによって環境中のウェアラブルユーザの位置情報の管理が正しく行えていることを確認した。また、視野内に存在するウェアラブルユーザに対して正しく注釈付けされており、ユーザが歩行程度の移動であれば遅延の影響もほとんど見られず、環境中を移動するユーザに対して定点カメラ、ウェアラブルユーザのどちらにも注釈付加画像を提示できることを確認した。



(a) サーバから取得したユーザの位置



(b) 定点カメラシステムの合成画像



(c) ユーザ A への提示画像

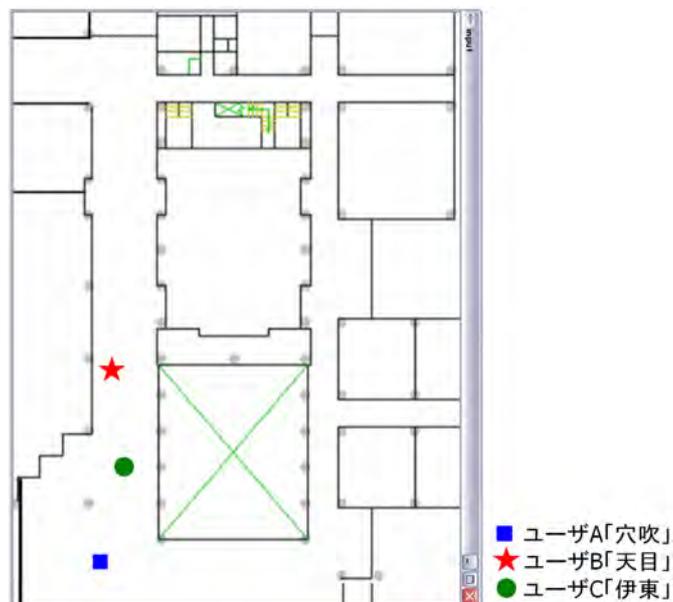


(d) ユーザ B への提示画像

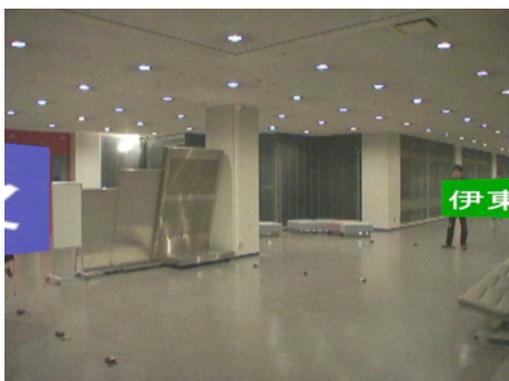


(e) ユーザ C への提示画像

図 22 状態 1 での注釈付加



(a) サーバから取得したユーザの位置



(b) 定点カメラシステムの合成画像



(c) ユーザ A への提示画像

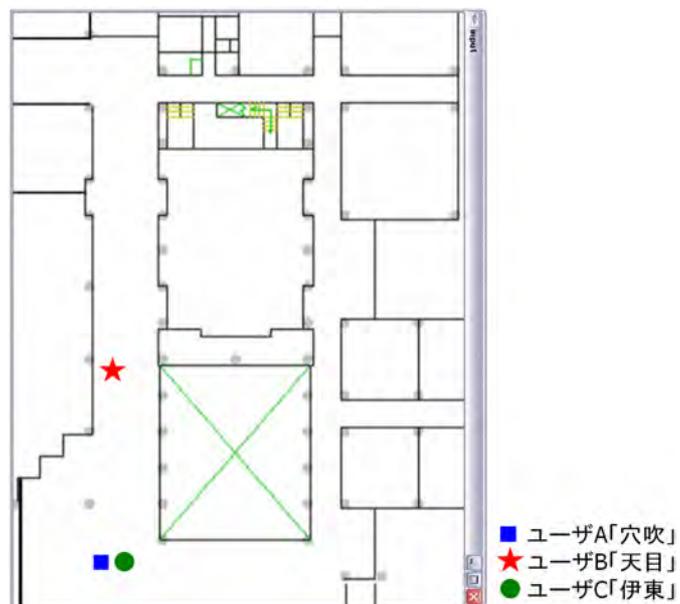


(d) ユーザ B への提示画像



(e) ユーザ C への提示画像

図 23 状態 2 での注釈付加



(a) サーバから取得したユーザの位置



(b) 定点カメラシステムの合成画像



(c) ユーザ A への提示画像



(d) ユーザ B への提示画像



(e) ユーザ C への提示画像

図 24 状態 3 での注釈付加

5. むすび

本論文では、ネットワーク共有型データベースを利用したウェアラブル拡張現実感システムにおいて、環境中のウェアラブルユーザの位置を管理することで、環境中を移動するユーザへの注釈付けを行う手法を提案した。提案システムは、サーバが共有データベースを用いて環境中のユーザ情報、ウェアラブルユーザの位置情報、ウェアラブルユーザに付加する注釈情報を管理することで、クライアントに最新の情報を提供できるだけでなく、セキュリティなどの問題にも対処可能である。また、提案方式の有用性を確認するためにプロトタイプシステムを構築し、無線ネットワークが利用可能な環境でウェアラブルユーザに対する注釈付加実験を行った。実験より、サーバが共有データベースを用いて環境中のウェアラブルユーザの位置情報を管理できること、無線の受信状況悪化による遅延は認められるものの本研究の想定する環境での注釈付加には大きな影響を与えないこと、およびウェアラブルコンピュータを装着したユーザに対して大きな位置ずれなく注釈付加画像を提示できることを確認した。今後の課題としては、複数の位置検出手法を用いたウェアラブルユーザが混在する環境での実験、および、多数のユーザが環境内に存在する状況下でのスケーラビリティに関する実験等が挙げられる。これらの課題を解決することで、広域環境において提案方式を利用した監視カメラなどのセキュリティサポートおよびウェアラブルユーザ間のコミュニケーションや協調作業のための実用的なアプリケーションを実現できると考えられる。

謝辞

本研究の全過程を通して、懇切なるご指導、ご鞭撻を賜った視覚情報メディア講座 横矢 直和教授に心より深謝いたします。本研究の遂行にあたり、有益なご助言、ご指導を頂いた知能情報処理学講座 木戸出 正継教授に厚く御礼申し上げます。本研究を進めるにあたり、暖かいご指導を頂いた視覚情報メディア講座 山澤 一誠助教授に深く感謝いたします。

そして、本研究の遂行に多大なるご助言、ご鞭撻を賜った視覚情報メディア講座 神原 誠之助手に深く御礼申し上げます。また、本研究を行うにあたり、適切なお助言を頂いた視覚情報メディア講座 佐藤 智和助手に深い感謝の意を表します。本研究の全過程を通して無数のご助言、ご指導を賜った視覚情報メディア講座 天目 隆平氏に心より深謝いたします。天目氏には、研究テーマの設定、システムの設計および構築、実験、論文の執筆、発表に至るすべてのプロセスにおいて特に細やかなご指導を頂きました。

物心両面において常に温かいご支援を頂いた視覚情報メディア講座の諸氏に深く感謝いたします。特に、昼夜にわたり過酷な環境下で本研究の実験を幾度となくお手伝いしていただいた伊東 大輔氏に深く感謝いたします。最後に、物心両面において常に温かいご支援を頂いた視覚情報メディア講座 守屋 知代女史に深く感謝します。

参考文献

- [1] S. Mann. Wearable computers: A first step toward personal imaging. *IEEE Computer*, Vol. 30, No. 2, pp. 25–32, 1997.
- [2] R. Azuma. A survey of augmented reality. *Presence*, Vol. 6, No. 4, pp. 355–385, 1997.
- [3] S. Feiner, B. MacIntyre, T. Höllerer, and A. Webster. A touring machine: Prototyping 3d mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. In *Proc. 1st Int. Symp. on Wearable Computers*, pp. 74–81, 1997.
- [4] 天目隆平, 神原誠之, 横矢直和. ウェアラブル拡張現実感を利用した屋外型観光案内システム. 情報科学技術フォーラム (FIT) 一般講演論文集, 第3巻, pp. 635–636, 2003.
- [5] R. Tenmoku, M. Kanbara, and N. Yokoya. A wearable augmented reality system using positioning infrastructures and a pedometer. In *Proc. 7th Int. Symp. on Wearable Computers*, pp. 110–117, 2003.
- [6] K. Makita, M. Kanbara, and N. Yokoya. Shared database of annotation information for wearable augmented reality system. In *Proc. SPIE*, Vol. 5291, pp. 464–471, 2004.
- [7] 高田大輔, 町田貴史, 清川清, 竹村治雄. ネットワーク共有型ウェアラブル拡張現実感システム開発用ライブラリ. 電子情報通信学会 総合大会講演論文集, p. 345, 2004.
- [8] 穴吹篤志, 天目隆平, 神原誠之, 横矢直和. データベース共有型ウェアラブル拡張現実感を用いた人物への注釈付け. 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集, pp. 83–84, 2004.
- [9] 穴吹篤志, 天目隆平, 神原誠之, 横矢直和. データベース共有型ウェアラブル拡張現実感を用いたウェアラブルユーザへの注釈付け. 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol. 10, No. 1, pp. 27–32, 2005.

- [10] M. Kanbara, T. Okuma, H. Takemura, and N. Yokoya. A stereoscopic video see-through augmented reality system based on real-time vision-based registration. In *Proc. IEEE Virtual Reality 2000*, pp. 255–262, 2000.
- [11] S. Julier, M. Lanzagorta, Y. Baillet, L. Rosenblum, S. Feiner, T. Höllerer, and S. Sestito. Information filtering for mobile augmented reality. In *Proc. IEEE/ACM 1st Int. Symp. on Augmented Reality*, pp. 3–11, 2000.
- [12] G. Klinker, D. Stricker, and D. Reiners. Augmented reality for exterior construction applications. In *Augmented Reality and Wearable Computers*, pp. 379–428. Lawrence Erlbaum Press, 2001.
- [13] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligmann. Knowledge-based augmented reality. *Communications of the ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 52–62, 1993.
- [14] <http://www.media.mit.edu/>.
- [15] <http://www.media.mit.edu/wearables/mithril/>.
- [16] <http://www.hitachi.co.jp/Prod/vims/wia/>.
- [17] 雨宮智浩, 檜山敦, 中茂睦裕, 福島智, 広田光一, 廣瀬通孝. 盲聾者ナビゲーションのためのウェアラブル指点字インタフェースの研究. ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 4, No. 3, pp. 11–14, 2002.
- [18] 小見正幸, 尾崎徹, 杉本千佳, 柴建次, 保坂寛, 板生清, 苗村潔. ヘルスケア用ウェアラブルセンシングユニットの開発研究. 2002年春季マイクロメカトロニクス学術講演会講演論文集, pp. 19–20, 2002.
- [19] 河村竜幸, 上岡隆宏, 浮田宗伯, 河野恭之, 木戸出正継. 着用指向情報パートナーにおける記憶支援システムの開発に向けて. 人工知能学会 第3回 AI 若手の集い (MYCOM2002), 2002.

- [20] J. Loomis, R. Golledge, R. Klatzky, J. Speigle, and J. Tietz. Personal guidance system for the visually impaired. In *Proc. 1st Conf. on Assistive technologies*, pp. 85–90, 1994.
- [21] A. State, G. Hirota, D. Chen, W. Garrett, and M. Livingston. Superior augmented reality registration by integrating landmark tracking and magnetic tracking. In *Proc. SIGGRAPH'96*, pp. 429–438, 1996.
- [22] H. Petrie, V. Johnson, T. Strothotte, A. Raab, S. Fritz, and R. Michel. MoBIC: Designing a travel aid for blind and elderly people. *Jour. of Navigation*, Vol. 49, No. 1, pp. 45–52, 1996.
- [23] K. Satoh, K. Hara, M. Anabuki, H. Yamamoto, and H. Tamura. TOWNWEAR: An outdoor wearable mr system with high-precision registration. In *Proc. Int. Symp. on Mixed Reality*, pp. 210–211, 2001.
- [24] M. Kouroggi, T. Kurata, and K. Sakaue. A panorama-based method of personal positioning and orientation and its real-time applications for wearable computers. In *Proc. 5th Int. Symp. on Wearable Computers*, pp. 107–114, 2001.
- [25] M. Billinghurst, S. Weghorst, and T. Furness. Wearable computers for three dimensional CSCW. In *Proc. 1st Int. Symp. on Wearable Computers*, pp. 39–46, 1997.
- [26] T. Kurata, T. Okuma, M. Kouroggi, T. Kato, and K. Sakaue. VizWear: Toward human-centered interaction through wearable vision and visualization. In *Proc. 2nd IEEE Pacific-Rim Conf. on Multimedia*, pp. 40–47, 2001.
- [27] T. Gleue and P. Dähne. Design and implementation of a mobile device for outdoor augmented reality in the archeoguide project. In *Proc. 2001 Conf. on Virtual Reality, Archeology, and Cultural Heritage*, pp. 28–30, 2001.
- [28] T. Höllerer and J. Pavlik. Situated documentaries: Embedding multimedia presentations in the real world. In *Proc. 3rd Int. Symp. on Wearable Computers*, pp.

79–86, 1999.

- [29] B. Thomas, V. Demczuk, W. Piekarski, D. Hepworth, and B. Gunther. A wearable computer system with augmented reality to support terrestrial navigation. In *Proc. 2nd Int. Symp. on Wearable Computers*, pp. 168–171, 1998.
- [30] B. Thomas, B. Close, J. Donoghue, J. Squires, P. De Bondi, M. Morris, and W. Piekarski. ARQuake: An outdoor/indoor augmented reality first person application. In *Proc. 4th Int. Symp. on Wearable Computers*, pp. 139–146, 2000.
- [31] A. Harter, A. Hopper, P. Steggles, A. Ward, and P. Webster. The anatomy of a context-aware application. *Wireless Networks*, Vol. 8, pp. 187–197, 2002.
- [32] M. Sakata, Y. Yasumuro, M. Imura, Y. Manabe, and K. Chihara. ALTAIR: Automatic location tracking system using active ir-tag. In *Proc. IEEE Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, pp. 299–304, 2003.
- [33] <http://www.hitachi.co.jp/Prod/vims/solutions/ssup/airlocation/>.