

修士論文

環境埋込み型センサによる位置同定と
歩数計測を利用したウェアラブル注釈提示システム

天目 隆平

2003年2月7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。

天目 隆平

審査委員： 横矢 直和 教授
木戸出 正継 教授
山澤 一誠 助教授

環境埋込み型センサによる位置同定と 歩数計測を利用したウェアラブル注釈提示システム*

天目 隆平

内容梗概

コンピュータグラフィクスで生成した情報などを現実環境の映像に融合する技術である拡張現実感を、ウェアラブルコンピュータを用いて実現する試みがなされている。これにより、ユーザの位置や姿勢に応じた情報を注釈としてユーザに直感的に提示することが可能となる。現実環境の正しい位置に注釈情報を提示するためには、ユーザの位置と姿勢を正確に計測する必要がある。従来、ユーザの位置を計測するのに、屋内では磁気トラッカ等、屋外では汎地球測位装置 (GPS) 等が広く用いられている。しかし、これらのセンサは一般に屋内又は屋外のいずれかでしか利用できないため、屋内外の両方で利用可能なシステムを構築しようとする機器構成が大規模で複雑になり、かつ屋内と屋外でセンサの切り替えを行う必要が生じる。

そこで本論文では、屋内外を問わず指定された地点においてユーザ位置を同定することのできる環境埋込み型センサと歩数計測を利用してユーザ位置を計測するウェアラブル型注釈提示システムを提案する。提案システムでは、実世界にユーザ位置同定インフラとして RFID タグと赤外線ビーコンの送信機が離散的に設置されている環境を想定しており、システムはこれらのインフラから位置情報を受け取ることでユーザ位置の特定を行う。ユーザが RFID タグや赤外線ビーコンの送信機が設置された地点から離れた場合は、加速度センサと電子コンパスを利用した歩数計測によりユーザの位置を推定する。ユーザの姿勢に関しては、従来広

* 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-MT0151068, 2003年2月7日.

く用いられている姿勢センサを利用する。実際に、提案システムを用いて、本学キャンパス内で案内を目的とした注釈付け実験を行い、提案システムの有効性の確認を行った。

キーワード

ウェアラブルコンピュータ, 拡張現実感, RFID タグ, 赤外線ビーコン, 歩数計測, 注釈提示システム

Wearable Annotation Overlay System Using Positioning Infrastructures and a Pedometer*

Ryuhei Tenmoku

Abstract

This paper describes an augmented reality (AR) system with a wearable computer to overlay an annotation relative to the real world. To overlay an annotation to the real world scene, the position and the orientation of user's viewpoint are needed. In order to acquire the user's position, Global Positioning System (GPS) and an electro-magnetic sensor are used in indoor and outdoor environments, respectively. Since each sensor cannot be used in both indoor and outdoor environments, a wearable AR system seamlessly used in both indoor and outdoor environments will become complicated and the system needs to switch the sensors between indoor and outdoor environments.

In this paper, we propose a wearable annotation overlay system using positioning infrastructures that can be used at the appointed points indoors and outdoors and a pedometer. The proposed system specifies the user's position by the position ID received from RFID tags or IrDA markers which are the components of positioning infrastructures embedded in the environment. When the user recedes from the points set up, the user's position is estimated by the pedometer which is configured by a digital compass and acceleration sensors. Experiments show the feasibility of the proposed system.

* Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0151068, February 7, 2003.

Keywords:

wearable computer, augmented reality, RFID tag, IrDA device, pedometer, annotation overlay system

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究と本研究の方針	3
2.1 ウェアラブルコンピュータに関する従来研究	3
2.2 拡張現実感に関する従来研究	5
2.3 ウェアラブル型拡張現実感システムと研究課題	5
2.4 本研究の位置づけと方針	10
3. 環境埋込み型センサによる位置同定と歩数計測を利用したウェアラブル型 注釈提示システム	13
3.1 プロトタイプシステムの機器構成	13
3.2 ユーザ位置の計測	17
3.2.1 環境埋込み型センサを利用した絶対位置の同定	18
3.2.2 歩数計測を利用したユーザ位置の推定	22
3.3 ユーザの姿勢の計測	24
3.4 注釈付加画像の生成	26
3.4.1 注釈付加画像の構成	26
3.4.2 注釈付加画像の合成手法	27
4. プロトタイプシステムを用いた実験	29
4.1 歩数計測の精度評価実験	29
4.2 プロトタイプシステムを用いた注釈付け実験	30
5. むすび	38
謝辞	40
参考文献	41

目 次

1	ウェアラブル拡張現実感の例	2
2	ウェアラブルコンピュータを装着したユーザの様子 (MIT メディア ラボ)	4
3	WIA(Wearable Internet Appliance)	4
4	KARMA[21]	6
5	従来のウェアラブル型拡張現実感システムの外観とユーザに提示 される画像の例 (続き)	9
6	RFID タグとタグリーダー	12
7	赤外線装置	12
8	ユーザの装備	14
9	プロトタイプシステムの機器構成	15
10	歩数計を装着したユーザの様子	17
11	ユーザの位置の計測	18
12	赤外線ビーコン発信機の設置例	19
13	赤外線ビーコン発信機の赤外線の届く範囲	19
14	天井に発信機を設置した際の赤外線ビーコンを受信可能な範囲	20
15	RFID タグの設置例	21
16	ユーザの腰部の前後方向の加速度と歩行動作の関係	23
17	姿勢センサのドリフト誤差削減処理のフローチャート	25
18	注釈付加画像の例	26
19	注視判定による注釈付加画像の相違	28
20	各歩数毎のおおよそのユーザの位置	30
21	正しく歩行動作を検出した際の歩数計測の結果	31
22	歩行動作の検出ミスが生じた際の歩数計測の結果	31
23	情報科学研究科入口付近の様子	32
24	情報科学研究科入口付近での注釈付加画像の例	33
25	情報科学研究科 B 棟 3 階の様子	35
26	情報科学研究科 B 棟 3 階での注釈付加画像の例	36

表 目 次

1	ウェアラブル型拡張現実感システムの例	7
2	従来のユーザの位置計測手法の特徴	11
3	ユーザが装着するセンサ	16
4	注釈情報の種類	26

1. はじめに

近年、計算機の小型化・高性能化に伴い、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, 2]。また、実画像に仮想物体をシームレスに重ね合わせる拡張現実感の研究もさかんに行われている [3]。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、より直感的に情報を獲得することができると考えられる。その例として、図 1 に示すように、道案内や博物館・観光名所のガイドなど様々な分野に応用が可能となる [4, 5]。しかし、実世界中の正しい位置に注釈情報を提示するためには、ユーザの位置及び姿勢を実時間で正確に計測する必要がある。従来、ユーザの位置を計測する手段として、屋内では磁気トラッカ等 [6]、屋外では汎地球測位装置 (GPS) 等が広く用いられている [7, 8, 9]。しかし、これらのセンサは一般に屋内又は屋外のいずれかでしか利用できない。また、屋内外の両方で利用可能なシステムを構築しようとする屋内外でセンサの切り替えを行う必要が生じたり、さらに一般に GPS 単独で屋外環境でユーザの位置を測定した場合、数メートルから十数メートルの誤差が生じる。そこで、通常の GPS に比べて精度の高いリアルタイムキネマティック GPS やディファレンシャル GPS などの利用が考えられる [10] が、いずれも計測に無線機を必要とし、機器構成が複雑になるという欠点がある。

そこで、本研究では、屋内・屋外でシームレスに利用することが可能なウェアラブル型拡張現実感システムの構築を目的とする。本論文では、屋内外を問わず指定された地点においてユーザ位置を同定することのできる環境埋込み型センサと歩数計測を利用してユーザ位置を計測するウェアラブル型注釈提示システムを提案する。環境埋込み型センサには赤外線ビーコンと RFID タグを用い、それらをユーザが装着するセンサを用いて識別することでユーザ位置の同定を行う。また、環境埋込み型センサからユーザが離れたときは、歩行方向と歩数を計測し、ユーザ位置の推定を行う。また、提案システムを用いてユーザに道案内の注釈情報を現実環境の映像に付加した注釈付加画像を提示するアプリケーションの開発について述べる。

以降、2 章では関連研究と本研究の方針について、3 章では提案システムの詳細について、4 章ではプロトタイプシステムを用いた実験について、5 章では本



図 1 ウェアラブル拡張現実感の例

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方針

本章では、本研究に関連する従来研究と本研究の方針について述べる。2.1 節ではウェアラブルコンピュータ、2.2 節では拡張現実感技術に関する従来研究についてそれぞれ概観する。2.3 節ではそれらの技術を組み合わせたウェアラブル型拡張現実感に関する従来研究と研究課題について、2.4 節では本研究の位置づけと方針について述べる。

2.1 ウェアラブルコンピュータに関する従来研究

ウェアラブルコンピュータとは、ユーザが装着することのできるコンピュータを意味し、近年の計算機の小型化・高性能化によりウェアラブルコンピュータに関する様々な研究が行われている。図2に、マサチューセッツ工科大(MIT)のメディアラボ [11] で開発されたウェアラブルコンピュータを装着したユーザの様子を示す。ユーザが携帯する計算機としてPDAが用いられるが、同所の定義では、ウェアラブルコンピュータとPDAの相違点として、PDAは使うときだけポケットから出して電源を入れるのに対し、ウェアラブルコンピュータは常時動作しているという点が挙げられる。図3に示す日立製作所が開発したウェアラブルコンピュータWIA(Wearable Internet Appliance)に代表されるようにウェアラブルコンピュータの市販化も行われている。これらに示されるように、ウェアラブルコンピュータの大きな特徴の一つに、表示デバイスとしてユーザが装着可能な小型ディスプレイを用いて利用者のみに対して情報提示を行うという点が挙げられる。また、入力デバイスにもユーザが歩きながら使用できるハンドマウス等が用いられたり、より拘束感なくウェアラブルコンピュータを利用可能にするために、ハンズフリーのインタフェースに関する研究も広くなされている [12, 13]。

具体的なウェアラブルコンピュータの利用法として、Lammingらはウェアラブルコンピュータの常時装着可能であるという利点を活かし、ユーザの記憶支援を行うアプリケーションを開発した [14]。また、Billinghamurstらは、遠隔地にいる別のユーザとの共同作業を行う際、ウェアラブルコンピュータを用いることで作業の効率化を試みた [15]。今後、機器のさらなる小型化・高性能化によりウェアラ



図 2 ウェアラブルコンピュータを装着したユーザの様子 (MIT メディアラボ)



図 3 WIA(Wearable Internet Appliance)

ブルコンピュータはますます普及し，より一般的なプラットフォームとしてユーザに認知されることが予想される．

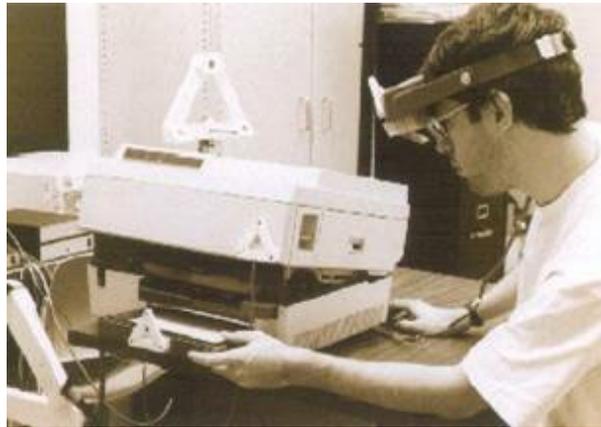
2.2 拡張現実感に関する従来研究

拡張現実感とは，現実環境の映像にコンピュータグラフィクス(CG)等で描かれた仮想物体をシームレスに重畳表示する技術である．拡張現実感を利用することで，現実環境に情報を付加することが可能となる．拡張現実感の応用として，現実の建築現場に設計図から起こした仮想の建物を合成して見せる景観シミュレーションや，現実環境におけるユーザの作業を支援するアプリケーションが挙げられる [16, 17, 18, 19, 20]．Feinerらは拡張現実感を利用してプリンタのメンテナンスを支援するアプリケーション KARMA を開発した [21]．KARMAでは，図4(a)に示すヘッドマウントディスプレイを装着したユーザは，図4(b)のように現実環境に仮想のCGが合成された画像を見ることができる．ユーザはこのようなCGで描かれた情報が重畳表示された画像を見ることで，次に現実世界のどのオブジェクトをどのように操作すればよいのかを直感的に認識することができる．

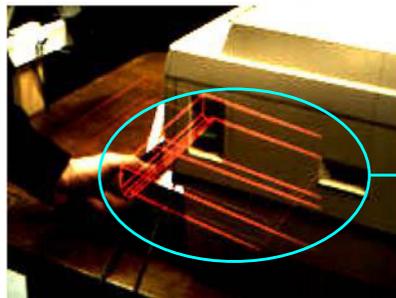
ユーザにとって違和感のない拡張現実環境を構築するためには，現実環境と仮想物体との間におけるいくつかの整合性問題を解決する必要がある．このうち，現実環境と仮想物体の幾何学的位置合わせは特に重要な技術課題である．現実環境と仮想物体を幾何学的に正しい位置関係で表示するためには，ユーザの視点位置および姿勢を実時間で計測する必要がある．これまでに，環境中に配置されたマーカを画像処理によって認識して位置合わせする手法 [22, 23, 24, 25] や，複数センサの結果を統合してより正確な位置合わせを実現する手法 [26, 27] が提案されている．

2.3 ウェアラブル型拡張現実感システムと研究課題

ウェアラブルコンピュータを装着したユーザは，屋内・屋外問わず広い範囲を移動することが可能である．よって，拡張現実感技術をウェアラブルコンピュータ上で実現することができれば，道案内や博物館・観光名所のガイドなど，ユー



(a) HMD を装着したユーザ



CGで描かれた仮想物体

(b) ユーザに提示される画像

図 4 KARMA[21]

ザの位置に応じて現実環境の映像に CG で描かれた情報を重畳表示することが可能である [28, 29, 30, 31, 32] . しかし , これらを実現するためには屋内外の広範囲を移動可能なユーザの位置を計測し続ける必要がある . そこで , ウェアラブル型拡張現実感システムの研究では , いかによりユーザの位置を計測するかが , 大きな技術課題として挙げられる . ユーザの姿勢に関しては , 一般に姿勢センサを用いることで計測することができる .

これまでに提案された主なウェアラブル型拡張現実感システムを表 1 に , システムの外観とユーザに提示される画像の例を図 5 に示す . 従来開発されてきたウェ

表 1 ウェアラブル型拡張現実感システムの例

名称	利用可能な環境	ユーザの位置計測手法
MARS[33, 34]	屋外	リアルタイムキネマティック GPS
ARCHEOGUIDE[35, 36]	屋外の指定した 地点	ディファレンシャル GPS
VizWear[37]	屋内	パノラマ画像とのマッチング
Weavy[38]	屋内	パノラマ画像とのマッチングと 歩数計測
ARQuake[39, 40]	屋内・屋外	ディファレンシャル GPS, 画像 マーカ

アラブル型拡張現実感システムは，ユーザへの情報提示範囲（屋内・屋外など）により大別できる．屋外において利用可能なシステムとして，Feinerらはユーザが見ている現実環境の映像に注釈情報を合成して提示するウェアラブル型拡張現実感システム MARS を提案した [33, 34]．また，Gleueらは，屋外環境の遺跡や神殿跡に CG で描かれた建造物を重畳表示し，観光客に提示することを目的としたウェアラブル型拡張現実感システム ARCHEOGUIDE を提案した [35, 36]．これらのシステムは表 1 に示すように，リアルタイムキネマティック GPS またはディファレンシャル GPS を用いてユーザの位置を計測している．

一方，屋内で利用可能なシステムの代表的なものに，会議室の前を通れば会議の予定がユーザに提示されるといった，位置に応じた情報を現実環境の映像に付加してユーザに提示するウェアラブル型拡張現実感システム VizWear がある [37]．VizWear では，環境中のパノラマ画像をシステムがあらかじめ保持しておき，それらのパノラマ画像とユーザの視点付近に設置されたカメラから得られる画像とのマッチングによりユーザの位置を推定する．また，興相らは，VizWear で用いているパノラマ画像とのマッチングに歩数計測を組み合わせることでユーザの位置をより精度良く計測し，位置に応じた情報を現実環境の映像に付加してユーザに提示するウェアラブル型拡張現実感システム Weavy を提案した [38]．

以上のような単一の手法によってユーザの位置を計測するため屋内または屋外



(a) MARS[33, 34]



(b) ARCHEOGUIDE[35, 36]



(c) VizWear[37]

図5 従来のウェアラブル型拡張現実感システムの外観とユーザに提示される画像の例



(d) Weavy[38]



(e) ARQuake[39, 40]

図 5 従来のウェアラブル型拡張現実感システムの外観とユーザに提示される画像の例 (続き)

のどちらかでしか利用できないシステムに対し，センサを組み合わせることで屋内・屋外の両方で利用可能なシステムの開発も行われている．Thomasらは，屋外環境ではディファレンシャルGPSを用いてユーザの位置を計測し，屋内環境では画像マーカを用いてユーザの位置を測定することで屋内および屋外で利用可能なアミューズメントを目的としたウェアラブル型拡張現実感システム ARQuake を提案している [39, 40] ．

2.4 本研究の位置づけと方針

前節で述べたとおり，ウェアラブル拡張現実感システムにおいては，ユーザの位置をいかに広範囲において計測するかが課題となる．従来研究におけるユーザ位置の計測手法を表2に挙げる．表2からわかるように，現状では屋内・屋外の両方においてユーザの位置が計測可能な機器は存在しない．そのため，屋内・屋外でユーザの位置を計測する場合，Thomasら [39, 40] のように，複数のセンサを組み合わせる必要がある．しかし，Thomasら [39, 40] の手法では，センサ類の複雑化・大型化や，センサ類の切り替えなどが必要となるなどの問題がある．

そこで，本論文では，屋内・屋外を問わず利用することが可能な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ことで，屋内・屋外の両方でシームレスにユーザの位置を計測し，利用することができるウェアラブル型拡張現実感システムを提案する．提案システムでは，環境埋め込み型センサとしてRFIDタグまたは赤外線ビーコンを利用してユーザの位置の同定を行う．図6の(a)に示すRFIDタグ内に格納された情報は図6(b)に示すタグリーダを近づけることで読むことが可能である．また，赤外線装置は，図7(a)に示す発信機からの赤外線ビーコンを(b)に示す受信機で受信することで情報を伝達することが可能である．本研究では，RFIDタグおよび赤外線ビーコン発信機を分岐点や案内板の前等の指定した地点に環境埋込み型センサとして設置する．ユーザはタグリーダおよび赤外線ビーコン受信機を装着し，環境埋込み型センサ内の位置情報を読み込むことでユーザの位置の特定を行う．さらに，ユーザが環境埋込み型センサから離れた場合は，電子コンパスと加速度センサから構成される歩数計を利用してユーザのおおまかな位置を推定する．電子コンパスで歩行方向を，加速度センサで歩数

表 2 従来のユーザの位置計測手法の特徴

ユーザの位置計測手法	適応可能な環境	利用するのに必要な手間	その他の問題点
GPS[7, 8, 9]	屋外	無し	数メートルから十数メートルの誤差が生じる
リアルタイムキネマティック GPS[33, 34] , ディファレンシャル GPS[10, 35, 36]	屋外	無し	無線機を利用するためユーザの装備が複雑になる
磁気トラッカ [6]	ソースの付近数メートル	磁気トラッカのソースの配置	広範囲への適用は困難
画像マーカ [39, 40]	主に屋内	画像マーカの配置	画像マーカをカメラで写す必要がある
パノラマ画像とのマッチング [37, 38]	屋内	環境中におけるパノラマ画像の撮影	環境の変化や照明条件の変化に対応できない

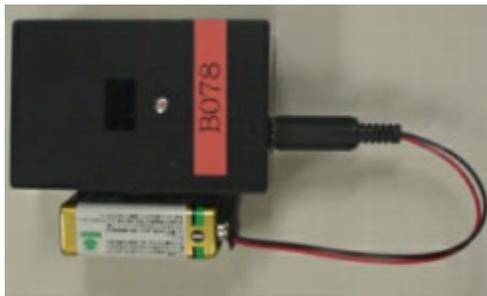


(a) RFID タグ

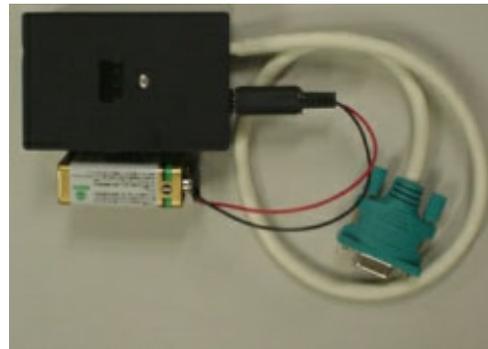


(b) RFID タグリーダー

図 6 RFID タグとタグリーダー



(a) 赤外線ビーコン発信機



(b) 赤外線ビーコン受信機

図 7 赤外線装置

をそれぞれ計測し，事前に与えておいたユーザの歩幅を用いて，環境埋込み型センサに対するユーザのおおまかな相対位置の推定を行う．さらにユーザの頭部に取り付けられた姿勢センサを利用してユーザの視線（頭部）の向きを計測する．ユーザの位置・姿勢の情報と，装着型計算機内に保持されている注釈情報データベースから計算機で注釈付加処理を行い，ユーザに提示する．

3. 環境埋込み型センサによる位置同定と歩数計測を利用したウェアラブル型注釈提示システム

本章では、環境埋込み型センサによるユーザの位置同定と歩数計測によるユーザの位置推定を利用したウェアラブル型注釈提示システムについて述べる。拡張現実感技術を用いて現実環境の映像に注釈を付加し、ユーザに提示するためには、ユーザの位置および姿勢を実時間で計測する必要がある。提案手法では、ユーザの位置の屋内外での計測を可能にするために、環境埋込み型センサによるユーザの位置同定と歩数計測によるユーザの位置推定を利用する。また、ユーザの姿勢に関しては、ユーザの装着するヘッドセットに取り付けられた姿勢センサを用いて計測する。さらに、提案手法では、これらの情報以外に注釈情報の内容及び重畳表示する現実環境の位置などをユーザが装着している計算機内に注釈情報データベースとして保持する。提案システムでは、ユーザの位置・姿勢および注釈情報データベースからユーザの位置に応じた注釈付加画像を生成し、ユーザに提示する。

本章では、3.1節でプロトタイプシステムの機器構成を、3.2節では環境埋込み型センサと歩数計測を利用したユーザの位置の計測手法について述べる。3.3節では姿勢センサを用いたユーザの姿勢の計測について、3.4節では注釈付加画像構成との生成手法についてそれぞれ述べる。なお、注釈情報データベースの内容に関しては、3.4節で述べる。

3.1 プロトタイプシステムの機器構成

図8にプロトタイプシステムにおけるユーザの装備を示す。ユーザは頭部に重さ約500gのヘッドセットを、腰部に歩数計を、腕部にRFIDタグリーダーを装着する。さらに計算機およびバッテリーが入った重さ約5kgのカバンを持つ。カバンの外側には赤外線ビーコン受信機が装着されており、ヘッドセットにはユーザの姿勢を計測する姿勢センサ、ユーザの視点付近からの現実環境の映像を獲得するカメラ、およびユーザに注釈付加画像を提示するための表示デバイスが装着されて



図 8 ユーザの装備

いる。図9に提案システムの機器構成を示す。本システムでは、図9に示すようにユーザは5種類のセンサと計算機と小型表示デバイスを装着する。各センサから得られたデータはUSB、シリアル、IEEE1394の各種ケーブルを介して計算機に送られる。計算機では、現実環境の映像に注釈情報を付加する処理を行い、小型表示デバイスに注釈付加画像を送る。以下にユーザが装着する機器の詳細を述べる。

センサ類 ユーザは表3に記す5種類のセンサを装着する。それぞれのセンサの特徴を以下に述べる。

姿勢センサ (Intersense: InterTrax²) : ユーザの視点付近に取り付けられ、ユーザの視線(頭部)の向きを計測する。データの更新レートは最大256Hzである。

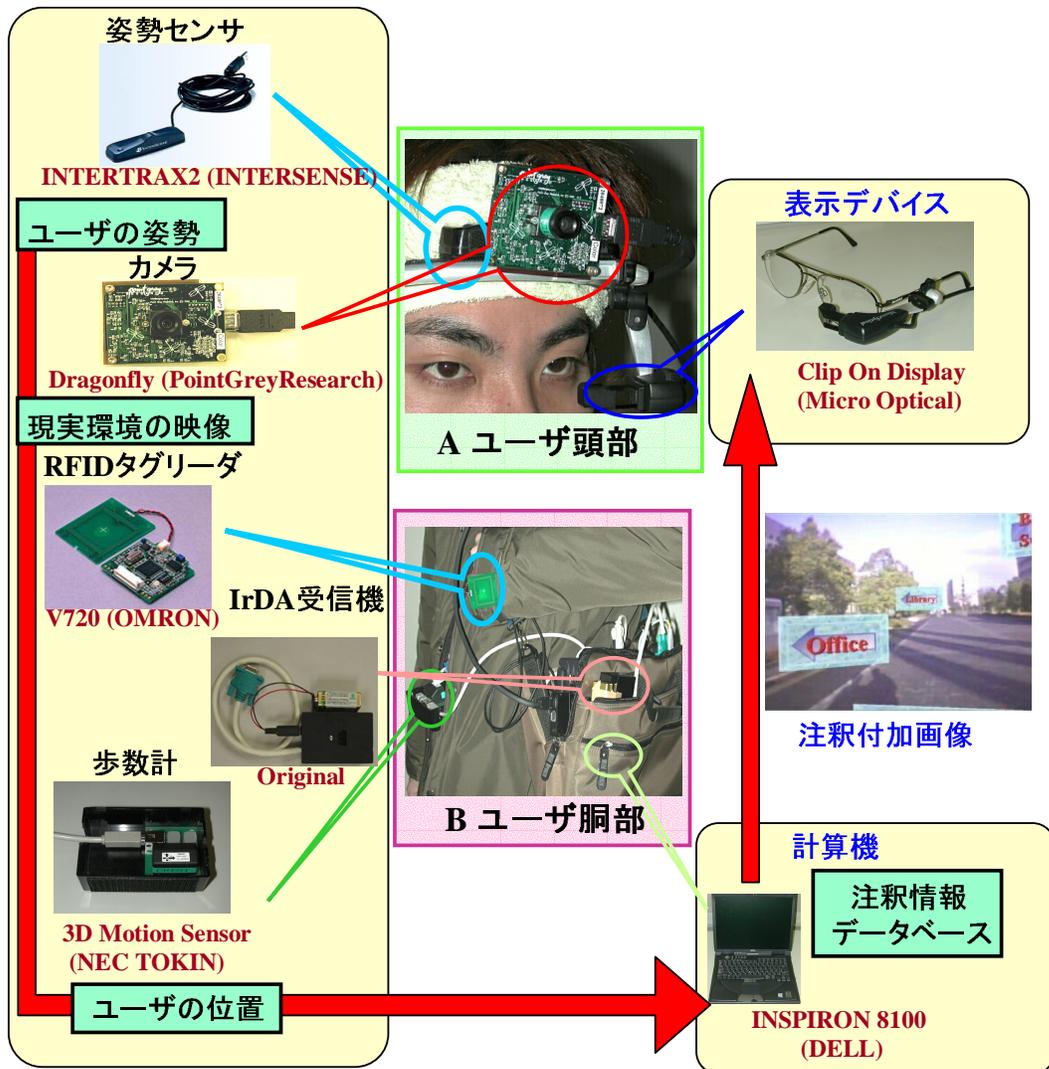


図 9 プロトタイプシステムの機器構成

表 3 ユーザが装着するセンサ

センサ名	獲得する情報	計算機との接続	電力の供給元
姿勢センサ	ユーザの姿勢	USB 接続	計算機
カメラ	現実環境の映像	IEEE1394 接続	計算機
赤外線ビーコン受信機	ユーザの位置	シリアル接続	9 V 乾電池
RFID タグリーダ	ユーザの位置	シリアル接続	9 V 乾電池
歩数計	ユーザの歩行方向・歩数	USB 接続	計算機

カメラ (Point Grey Research: Dragonfly) : ユーザの視点付近に視線方向とカメラの光軸を一致させるように装着し, ユーザが見ている現実環境と同様の映像を獲得する. 縦 480 画素, 横 640 画素の RGB 各 8 ビットのカラー画像を 30 フレーム毎秒でキャプチャーすることが可能である.

赤外線ビーコン受信機 (MI systems: オリジナル) : ユーザが持つカバンに上向きに取り付けられ, 発信機からの信号の届く範囲内に入ると, ユーザの位置を特定することができる. 発信機は案内板の前や分岐点などに設置し, 各発信機は位置を表すビーコンを常時発している.

RFID タグリーダ (OMRON: RFID タグリードライトモジュール) : 本センサのリード面を RFID タグに近づける (約 5 cm 以内) ことで RFID タグ内に格納されたデータの読み書きを行うことができる. 環境中に設置された RFID タグにユーザが左手の甲に装着された本センサのリード面を近づけることで, システムはユーザ位置の特定を行うことができる.

歩数計 (NEC TOKIN: 3D モーションセンサ) : コンパスと加速度センサから構成され, センサの方位角と 2 軸方向の加速度を計測することができる. 提案システムでは, 図 10 に示すように, ユーザが本センサを腰に装着することで, ユーザの歩行方向と歩数を計測し, 環境埋込み型

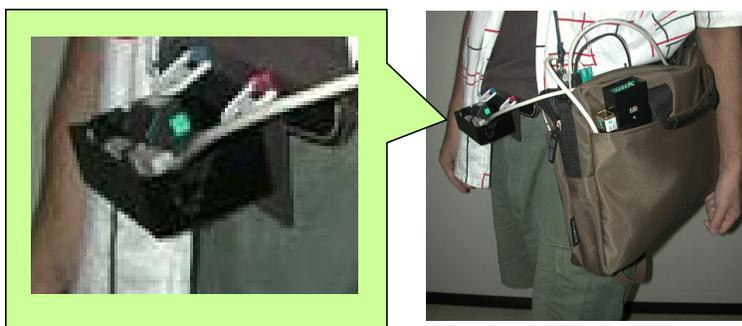


図 10 歩数計を装着したユーザの様子

センサが設置された地点からの歩行方向と歩数からユーザのおおまかな位置を推定する．センサのデータの更新レートは最大 125 Hz である

計算機 (DELL: Inspiron8100, PentiumIII 1.2GHz, 512Mbytes memory) : 各センサから得られたデータと計算機内に保持している注釈情報データベースから，現実環境に注釈を付加する処理を行う．

小型表示デバイス (MicroOptical: Clip On Display) : 本デバイスはビデオスルー型の表示デバイスである．ユーザは図 9 のようにヘッドセット部分に装着し，ユーザは本デバイスを用いて注釈付加画像を見ることができる．本デバイスは縦 480 画素，横 640 画素の RGB 各 8 ビットのカラー画像を表示可能である．なお，電力はユーザが装着したカバンに格納された専用のコントロールボックスから供給される．

3.2 ユーザ位置の計測

ユーザの位置は，環境埋込み型センサと歩数計を利用することで計測する．図 11 にユーザの位置の計測手法の概要を示す．ユーザの位置を指定した地点において正確に特定するために赤外線ビーコンの送信機や RFID タグの環境埋込み型センサを利用する．分岐点や案内板の前などの指定した地点に環境埋込み型センサ

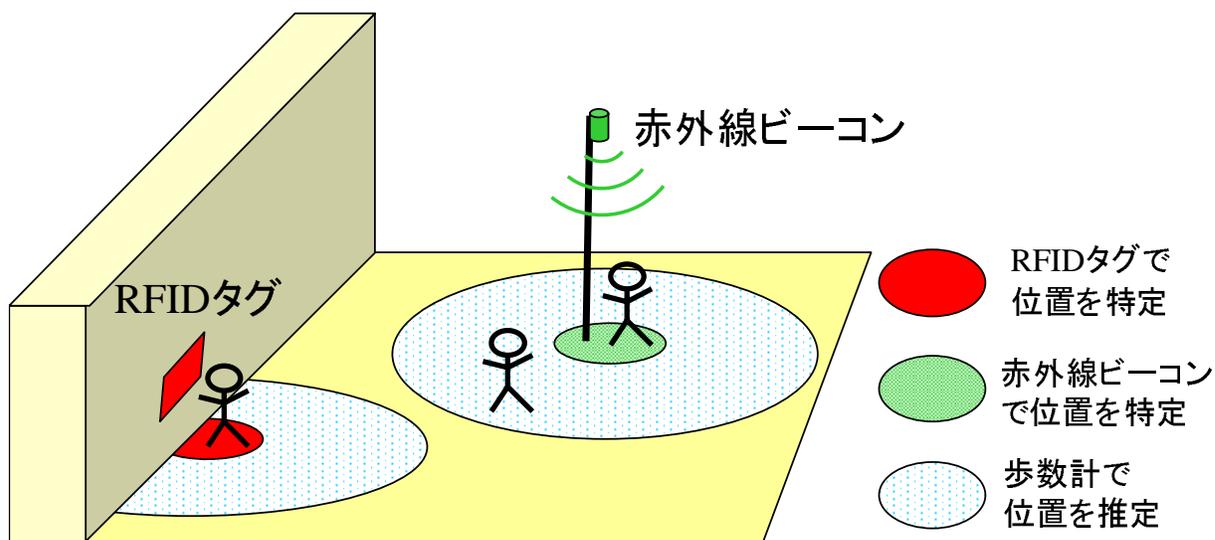


図 11 ユーザの位置の計測

を設置し，赤外線ビーコンの受信機や RFID タグリーダ等の環境埋込み型センサを識別可能な機器をユーザが装着する．ユーザが環境埋込み型センサから位置 ID を受信しているときは，その位置 ID によってユーザの絶対位置を特定する．位置 ID を受信していないときは，位置 ID を受信した地点からのユーザの相対位置を歩数計測によって推定する．以下，環境埋込み型センサによる位置同定手法および歩数計測による位置推定手法についてそれぞれ述べる．

3.2.1 環境埋込み型センサを利用した絶対位置の同定

提案手法では，環境埋込み型センサを利用してユーザの位置を指定した地点において正確に特定する．プロトタイプシステムでは，先に述べたように赤外線ビーコン発信機と RFID タグの二種類の環境埋込み型センサを利用する．それら二種類の環境埋込み型センサの特徴について以下に述べる．

1. 赤外線ビーコン

図 12 に赤外線ビーコン発信機の設置例を示す．また，ユーザはそれらを識別

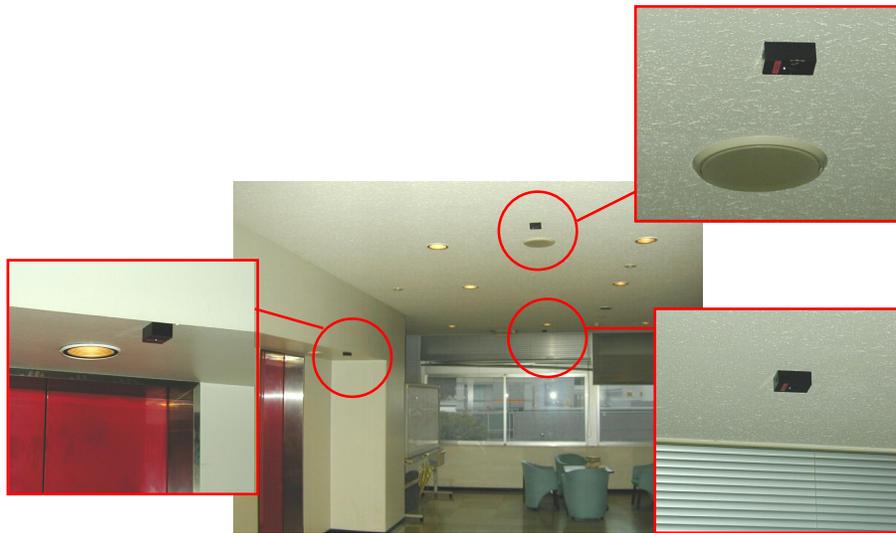


図 12 赤外線ビーコン発信機の設置例

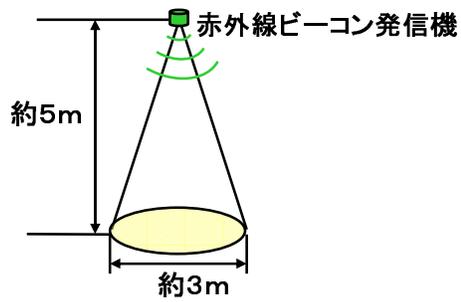


図 13 赤外線ビーコン発信機の赤外線が届く範囲

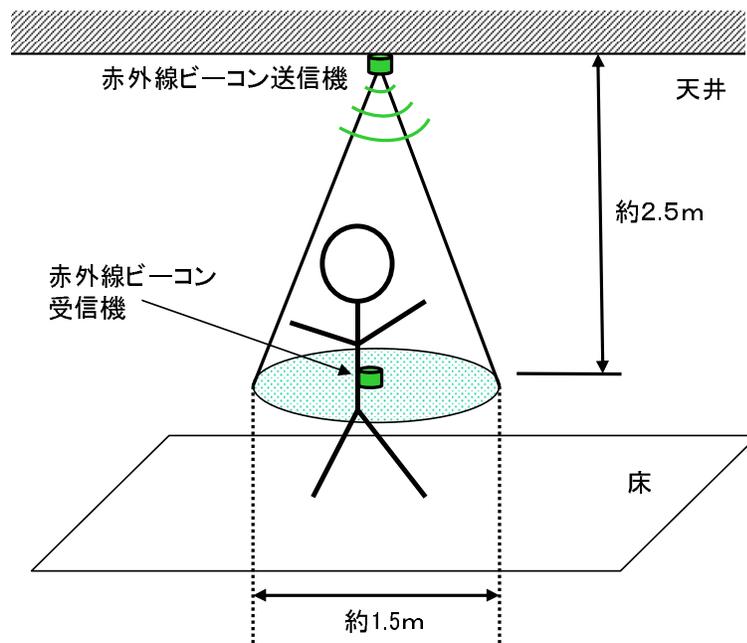


図 14 天井に発信機を設置した際の赤外線ビーコンを受信可能な範囲



図 15 RFID タグの設置例

することのできる受信機を図9に示すように装着する。発信機からは、その発信機が設置された地点を示す位置 ID を含む指向性を持つ赤外線ビーコンが発信され、ユーザが装着する受信機がこれらの位置 ID を含む赤外線ビーコンを受信することでユーザ位置の特定を行うことができる。赤外線の届く範囲は図13に示すような高さ約5メートル・直径約3メートルの円錐形となる。屋内環境では、赤外線ビーコン発信機を図12に示すように天井に設置し、その下を通過するユーザに向けて赤外線を発信することで、容易にユーザの位置の同定を行うことができる。一般的な屋内環境であれば天井に設置した赤外線ビーコン送信機とユーザのカバンに装着した受信機との高低差は約2.5メートルとなる。図13に示す赤外線ビーコンの到達範囲より、このときの赤外線ビーコンを受信可能な範囲は、図14に示すように直径約1.5メートルの円となる。すなわち、ユーザがこの範囲内にいるときは、ユーザは天井に設置された赤外線ビーコンの位置 ID を受信する。

2. RFID タグ

ユーザの腕に装着されたタグリーダを、環境埋込み型センサとして指定した地点に設置された RFID タグ(図15参照)に近づける(約5cm)ことで、RFID タグ内に保持されている位置 ID を読み取り、ユーザ位置の同定を行う。

赤外線ビーコンを用いる利点は、ユーザの位置同定を行うのに RFID タグにタグリーダを近づけるといったような特別な動作を必要としないことである。それに対して、RFID タグを用いる利点は、環境埋込み型センサとして環境中に設置する RFID タグが電力を必要としないことである。

3.2.2 歩数計測を利用したユーザ位置の推定

ユーザが環境埋込み型センサから離れたときは、歩数計測を用いてユーザの位置を推定する。歩数計測には、ユーザの腰に装着したコンパスと加速度センサから構成される歩数計を用いる [41, 42, 43]。歩数計を用いてユーザが歩行する際の腰の部分の加速度の変化と腰の向きを計測することで、ユーザの歩数と歩行方向を測定する。この計測結果と事前に与えておいたユーザの歩幅から、環境埋込み型センサから離れた場合においても、ユーザのおおまかな位置を推定することができる。提案システムでは、ユーザの腰の向きをユーザの歩行する向きとみなし、コンパスでユーザの歩行方向を計測する。また、人間の歩行動作は腰部の鉛直方向や前後方向の加速度に周期的なパターンとして現れる。そこで、加速度センサを利用してユーザの腰の前後方向の加速度を測定し、このパターンを検出することによってユーザの歩行動作を検出する。

ユーザの歩行時の腰部の前後方向の加速度とユーザの歩行動作の関係の一例を図 16 に示す。図 16 中の赤色で描かれたグラフが歩行時の腰の前後方向の加速度を表し、緑色の矩形波が手動で与えたユーザの歩数動作を表す。緑色の矩形波は、連続する一組の凹凸でユーザが一步歩いたことを示す。手動で与えた歩行動作と、歩行時の腰の前後方向の加速度を比較すると、腰の前後方向の加速度の連続する極大値と極小値の組がユーザの歩行動作の 1 歩分に対応していることがわかる。すなわち、連続する極大値と極小値の組をユーザの一步の歩行動作とみなすことができ、ユーザの歩行動作を検出するのに用いることができる。提案手法では、極大値と極小値を検出する 2 つの閾値を用意し、一定時間内に極大値と極小値が検出されたとき、ユーザの歩行動作を検出する。図 16 中の青色と水色で描かれたグラフがそれぞれ極大値と極小値を検出する閾値を示す。図 16 中の縦軸と平行な黒色の実線は、提案手法によってユーザの歩行動作が検出された時刻を示す。

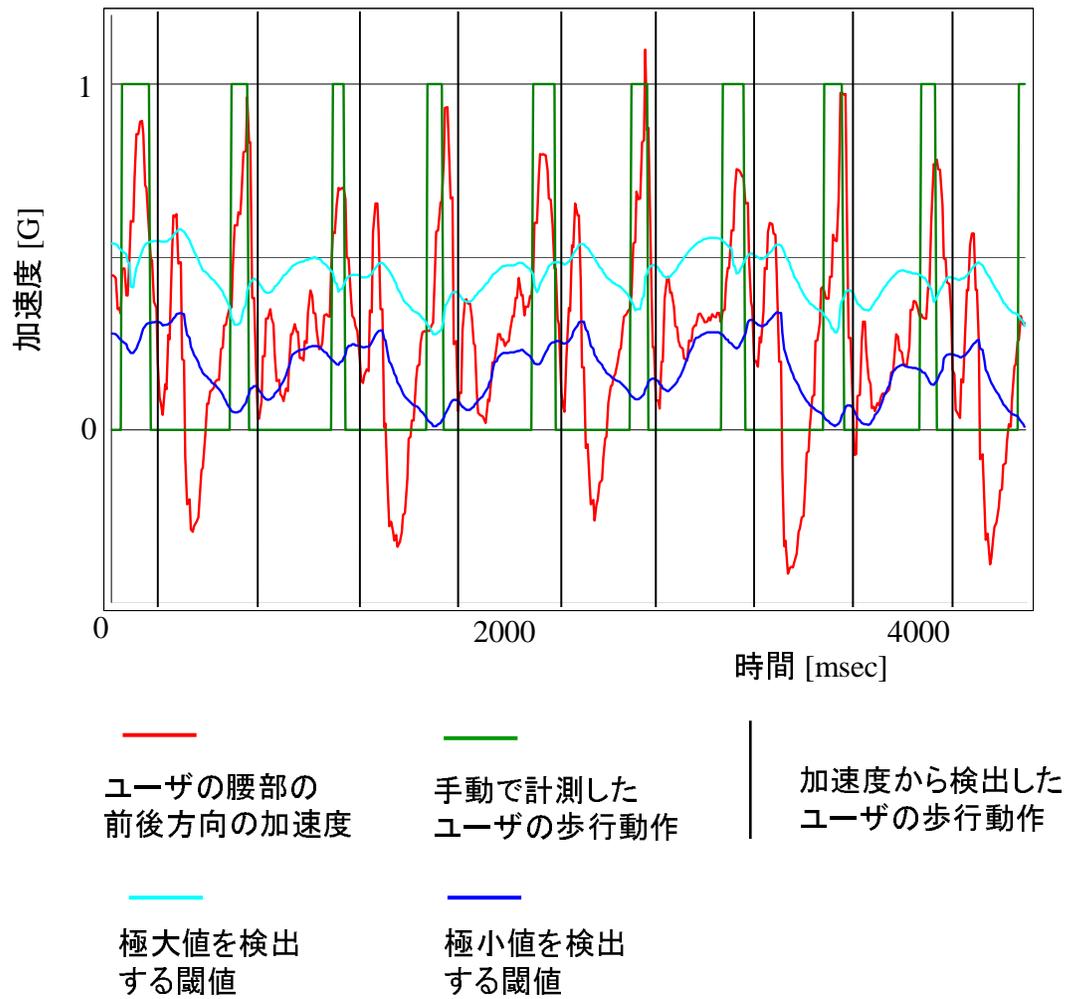


図 16 ユーザの腰部の前後方向の加速度と歩行動作の関係

手動で与えたユーザの歩行動作と提案手法によって検出されたユーザの歩行動作を比較すると、提案手法によって高い精度でユーザの歩行動作が検出されていることがわかる。

提案手法では、加速度の極大値と極小値を検出するための閾値を、ユーザの過去の腰部の前後方向の加速度データから算出するため、ユーザの歩き方の違いによる歩行検出のミスを軽減している。このため、システムの歩行動作の有無の検出精度は高いが、実際のユーザの歩幅は、事前に与えておいたユーザのおおよその歩幅（ユーザの身長 \times 0.4）とは厳密には異なるため、歩数計測による誤差はユーザの歩行距離に応じて蓄積する。また、ユーザの腰部の向きと実際の歩行方向との差も、歩数計測による蓄積誤差の大きな要因となる。提案システムでは、ユーザが環境埋込み型センサから位置 ID を受信するたびに、歩数計測による蓄積誤差がリセットされる。

3.3 ユーザの姿勢の計測

ユーザの姿勢の計測には、ユーザのヘッドセットに装着された姿勢センサを用いる。しかし、一般に姿勢センサには誤差が生じるため、姿勢センサのみから常にユーザの姿勢を正確に計測することは困難である。姿勢センサの誤差には、長時間の利用や高速回転などによって生じる蓄積誤差と、温度変化等から生じるドリフト誤差と呼ばれる誤差の2種類の誤差がある。ドリフト誤差は、姿勢センサの出力に余分なオフセットが付く誤差である。提案手法では、画像処理を用いて姿勢センサのドリフト誤差量を推定し、ドリフト誤差の削減を行う。また、姿勢センサとユーザの視点付近に装着されたカメラから得られる現実環境の映像の間には同期ずれが生じている。提案システムでは姿勢センサの計測データを数フレーム遅延させることで、この同期ずれを軽減している。

図 17 に姿勢センサのドリフト誤差削減のフローチャートを記す。毎フレームの処理として、ユーザの視線付近からの現実環境を獲得するカメラの入力画像の中央部分において、現在のフレームと直前のフレームのフレーム間差分をとる。これら2フレーム間における画像中央部分の差分が閾値以下のときは、現在のフレームと直前のフレームにおいてカメラから獲得された画像がほとんど変化して

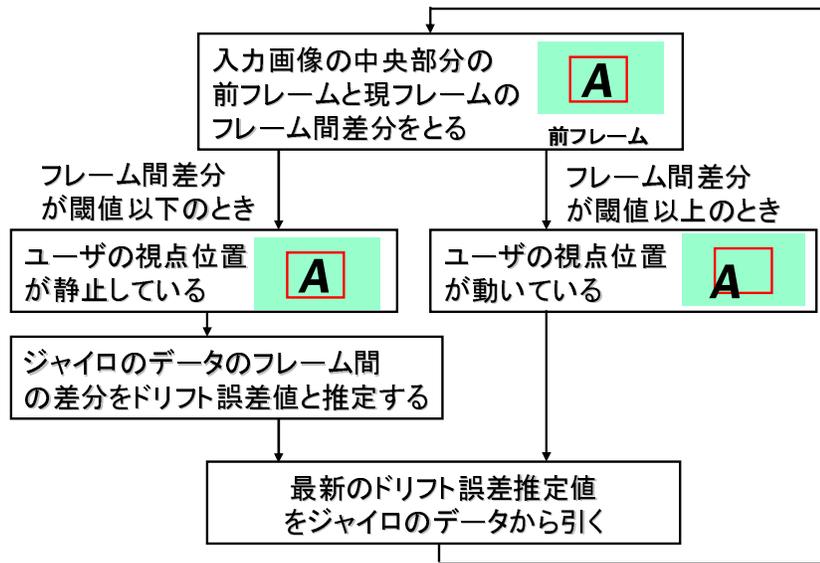


図 17 姿勢センサのドリフト誤差削減処理のフローチャート

いないことを意味する。このとき、ユーザの視線が変化していないと判断する。一方、2フレーム間における画像の中央部分の差分が閾値より大きいときは、この2フレーム間でユーザの視点の位置が動いたと判断する。ユーザの視線が変化していないときは、2フレーム間の姿勢センサのデータの差がドリフト誤差量であると推定する。このようにして求められたドリフト誤差推定量を、姿勢センサのデータから毎フレーム引くことでドリフト誤差の大幅な削減を行う。

また、長時間の利用や高速回転などによって生じる姿勢センサの蓄積誤差に関しては、現状ではユーザが手動でリセットする。今後、コンパスや重力センサと組み合わせることで、姿勢センサの蓄積誤差を削減する必要がある。

表 4 注釈情報の種類

矢印	対象物を指す．
案内情報	対象物の名称を示す．
インジケータ	システムの状態をユーザに知らせる．
詳細情報	対象物の詳細な情報を示す．ユーザが案内情報を注視したときのみ画面右下に表示される．

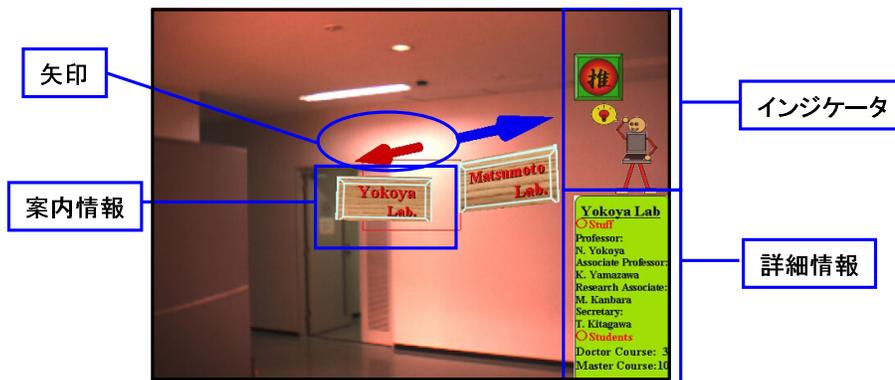


図 18 注釈付加画像の例

3.4 注釈付加画像の生成

3.4.1 注釈付加画像の構成

提案手法を用いたプロトタイプシステムによって生成される注釈付加画像は、図 18 に示すように、ユーザの視点付近に装着されたカメラからの現実環境の映像に表 4 に示す 4 種類の情報が重畳表示された画像である。これらのうち、矢印と案内情報は、現実環境の指定された地点に実在するオブジェクトのように描画され、インジケータおよび詳細情報は画面の右隅の特定の位置に表示される。

3.4.2 注釈付加画像の合成手法

提案手法を用いたプロトタイプシステムによって、図 18 に示す注釈付加画像を生成する手法について述べる。提案手法では、ユーザの位置・姿勢、ユーザの視点付近からの現実環境の映像、および注釈情報データベースを用いて注釈付加画像を生成する。注釈情報データベースは、ユーザが持つ計算機内にあらかじめ保持されており、以下の情報から構成される。

- 案内情報と詳細情報の注釈画像
- 矢印の向き
- 矢印と案内情報の、環境埋込み型センサが設置された位置からの相対的な三次元座標

注釈付加画像は、ユーザの位置・姿勢に応じた注釈情報が現実環境の映像に付加された画像である。以下にユーザの位置および姿勢に応じた注釈付加画像を生成する手法の 3 つのステップを示す。

- step1 ユーザの位置・姿勢を計測結果および注釈情報データベースに含まれる案内情報の三次元座標および矢印の向きより、ユーザと環境中に重畳表示された案内情報の位置および矢印の姿勢関係が定まる。なお、案内情報はユーザに正対するように表示する。
- step2 ユーザの視点付近に装着されたカメラの光軸の向きとユーザに対する案内情報の向きがほぼ一致するとき、すなわちユーザが案内情報を画像の中央部分で捉えているとき、ユーザはその案内情報を注視しているとシステムは判断する。
- step3 step2 においてユーザが案内情報を注視していると判断された場合は、注釈付加画像の右下部分に、その案内情報に対応した詳細情報を重畳表示してユーザに提示する。図 19 に注視判定による注釈付加画像の相違を示す。ユーザが案内情報を注視していないとシステムが判断した場合の注釈付加画像の例を図 19(a) に、一方、ユーザが案内情報を画像の中央部分で捉え、システム



(a) 案内情報を注視していないときの注釈付加画像の例 (b) 案内情報を注視しているときの注釈付加画像の例

図 19 注視判定による注釈付加画像の相違

によってユーザがその案内情報を注視していると判断された場合の注釈付加画像の例を図 19(b) に、それぞれ示す。

4. プロトタイプシステムを用いた実験

前章で述べたプロトタイプシステムの実装を行い，提案手法における歩数計測の精度評価実験と本学構内での注釈付け実験を行った．歩数計測の評価実験は 4.1 節で，本学構内での注釈付け実験については 4.2 節で述べる．

4.1 歩数計測の精度評価実験

ユーザの歩行動作の検出精度および歩数計測の定性的な精度評価を行う実験を行った．提案手法では，ユーザの歩幅を一定であると仮定し，ユーザの身長から計算したおおよその歩幅を事前に与えているが，この仮定した歩幅と実際のユーザの歩幅との差は，歩数計測による蓄積誤差の要因となりうる．本実験では，この歩幅による誤差は生じないものと仮定する．

ユーザが一辺 2.8m の正方形の周上を左回りに 4 回歩行した際の歩数計測による位置推定を行った．水平面上に x - y 平面を設定し，ユーザが歩行を開始する地点を原点 (0,0) とし，ユーザの歩幅が約 70cm であると仮定すると，ユーザの歩数毎の実際のおおよその位置は図 20 に示す通りである．図 20 中の円内の数字がユーザの歩数を， x - y 座標中の円の位置が歩数に対応する実際のユーザのおおよその位置を示す．ユーザは 4 歩で正方形の各辺を歩行し，16 歩目で再び原点に戻る．4 回の歩行計測のうち，3 回の歩行計測では 16 歩全ての歩行動作を正しく検出することができたが，残りの 1 回の歩行計測では，15 歩の歩行動作しか検出されなかった．正しく歩行動作を検出できたときの歩行計測の結果を図 21 に，歩行動作の検出ミスが生じたときの歩数計測の結果を図 22 に示す．歩行動作の検出ミスが生じた歩行計測では，1 歩目から 4 歩目までの歩行動作のうちの 1 歩分の歩行動作が検出されなかった．

本実験では，提案手法によってユーザの 64 歩の歩行動作のうち 63 歩の歩行動作を検出した．また，歩行動作がないときに歩行動作が誤検出されることも見られなかった．これより，高い精度でユーザの歩行動作の検出が行えていることがわかる．また，図 21 より，ユーザの歩行方向の計測誤差は頻繁に生じ，歩数計測における蓄積誤差の大きな要因を占めていることがわかる．さらに，図 22 よ

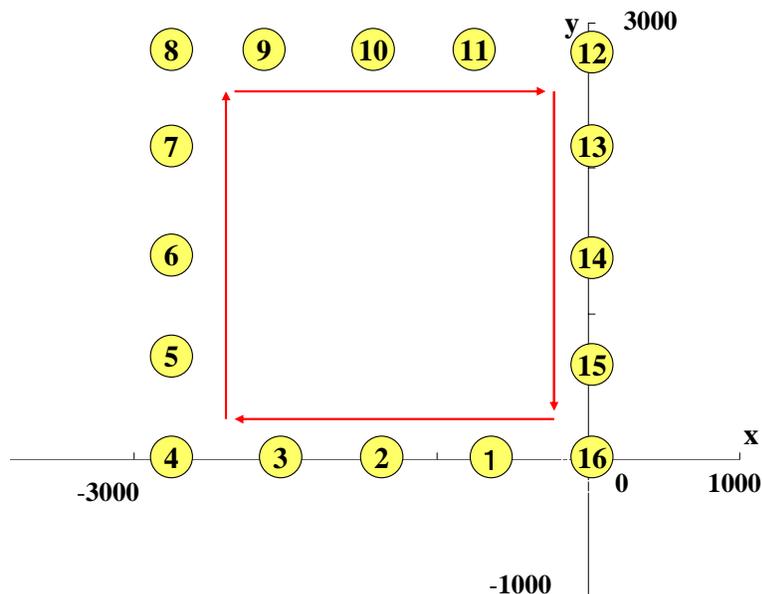


図 20 各歩数毎のおおよそのユーザの位置

り、ユーザの歩行動作の検出ミスが生じると、それ以降のユーザの位置推定に誤差が蓄積することがわかる。しかし、いずれの要因による蓄積誤差も、ユーザの歩行距離が数メートル程度ならば多くとも1メートル程度の誤差であり、注釈情報の提示に大きな影響はないと考えられる。ただし、これらの誤差はユーザが環境埋込み型センサから離れるに従って大きくなると考えられるので、注釈情報の提示に影響を及ぼすような大きな誤差が蓄積する前に、位置IDを受信して誤差をリセットできるように環境埋込み型センサを配置する必要がある。

4.2 プロトタイプシステムを用いた注釈付け実験

前章で述べたプロトタイプシステムを用いて、様々な環境でユーザに注釈付加画像を提示する実験を本学構内で行った。実験では、ユーザが情報科学研究科入口から情報科学研究科B棟3階の横矢研究室まで移動することを想定し、道中の施設の案内情報を付加した注釈付加画像をユーザに提示した。以下に、情報科学研究科入口付近と情報科学研究科B棟3階での実験の様子を記す。

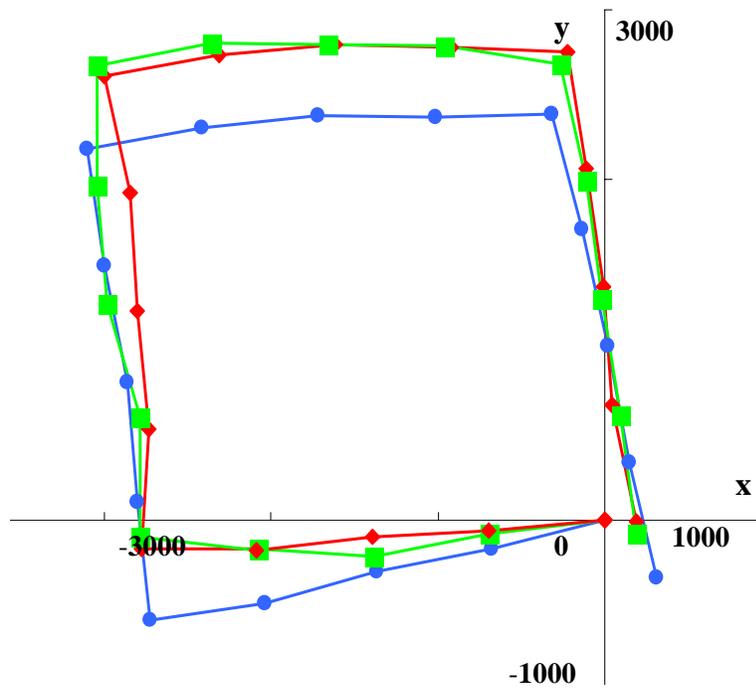


図 21 正しく歩行動作を検出した際の歩数計測の結果

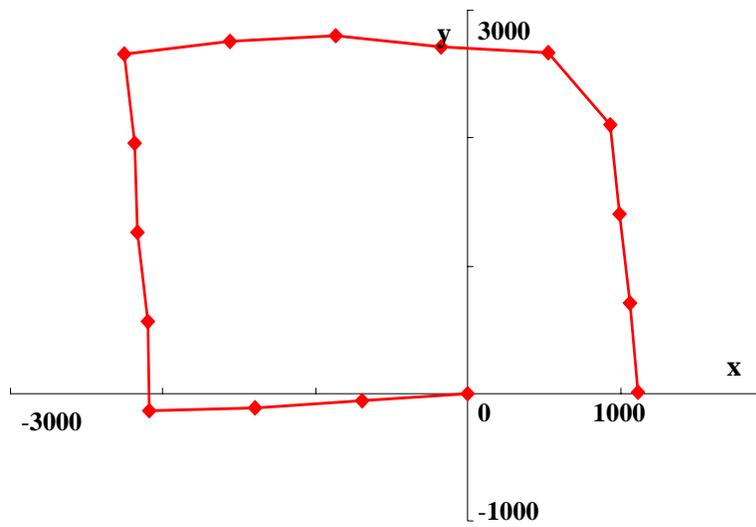


図 22 歩行動作の検出ミスが生じた際の歩数計測の結果

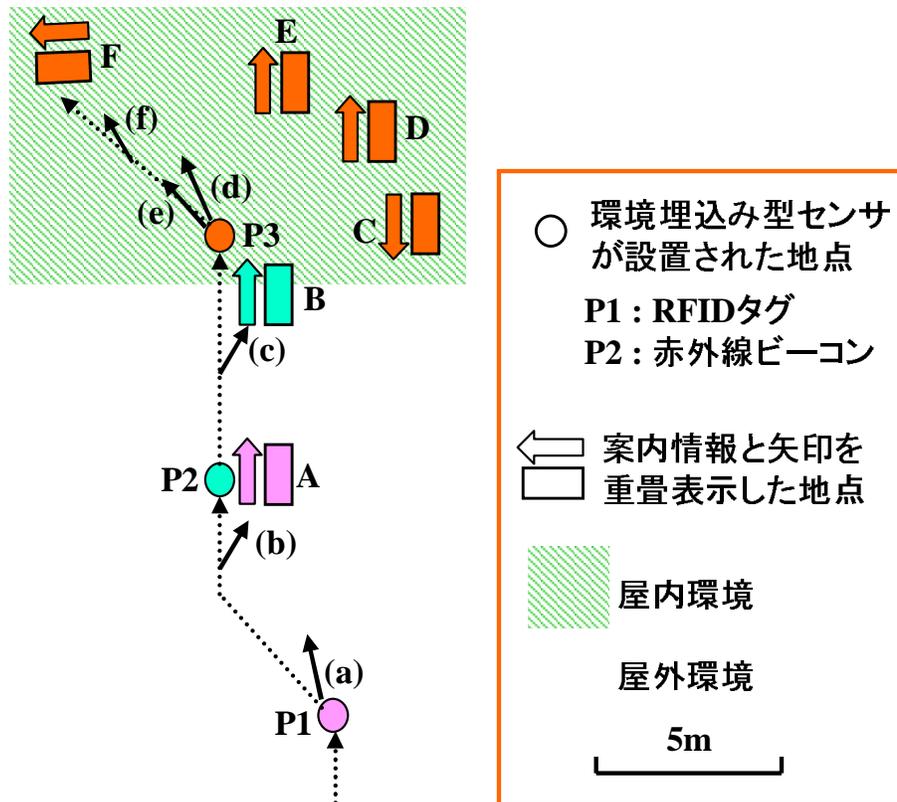


図 23 情報科学研究科入口付近の様子



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

図 24 情報科学研究科入口付近での注釈付加画像の例

- 情報科学研究科入口付近での注釈付け実験

図 23 に情報科学研究科入口付近の様子を示す。図 23 中の P1, P2, P3 には環境埋込み型センサが設置されている。P1 は RFID タグが、P2 および P3 は赤外線ビーコン送信機が、それぞれ設置された地点を示す。実験ではユーザは破線矢印に沿って P1, P2, P3 を順に通過するように歩行を行った。現実環境の映像に CG で描かれた案内情報を図 23 中の A から F の 6 箇所に重畳表示し、ユーザに注釈付加画像を提示した。図 24 の (a) から (f) は、それぞれユーザが図 23 中の (a) から (f) の地点にいるときに (a) から (f) の実線矢印の方向を向いているときにユーザに提示された注釈付加画像である。図 24 の (a),(d),(e) は、環境埋込み型センサを用いて同定したユーザの位置に基づいて生成された注釈付加画像である。一方、図 24 の (b),(c),(f) はそれぞれ環境埋込み型センサが設置された地点からの相対的な位置を歩数計測を用いることで推定したユーザの位置に基づいて生成された注釈付加画像である。図 24 の (b),(c),(f) はいずれも、環境埋込み型センサが設置された地点から 10 歩歩行した際に生成された注釈付加画像である。

- 情報科学研究科 B 棟 3 階での注釈付け実験

図 25 に情報科学研究科 B 棟 3 階の様子を示す。図 25 中の P4, P5, P6 は環境埋込み型センサとして赤外線ビーコン送信機が設置された地点を示す。情報科学研究科入口付近での実験と同様に、図 26 の (g) から (l) は、それぞれユーザが図 25 中の (g) から (l) の地点にいるときに (g) から (l) の実線矢印の方向を向いているときにユーザに提示された注釈付加画像を示す。なお、(h) は (g) の位置から 6 歩、(j) は (i) の位置から 6 歩、(l) は (k) の位置から 4 歩、ユーザが図 25 中の破線矢印に沿って歩行した際の注釈付加画像である。

本実験により、屋内・屋外両方の環境で、環境埋込み型センサでユーザの位置を特定した地点からユーザが数メートルから 10 メートル程度移動した場合でも、歩数計測によってユーザの位置を推定し、建物等の注釈情報を現実環境の正しい位置に表示できることを確認した。また、ユーザが屋内環境と屋内環境の間を移動しても、両環境でシームレスにユーザの位置計測を行い、提案システムによってユーザの位置に応じた注釈付加画像が生成されユーザに提示することができる。

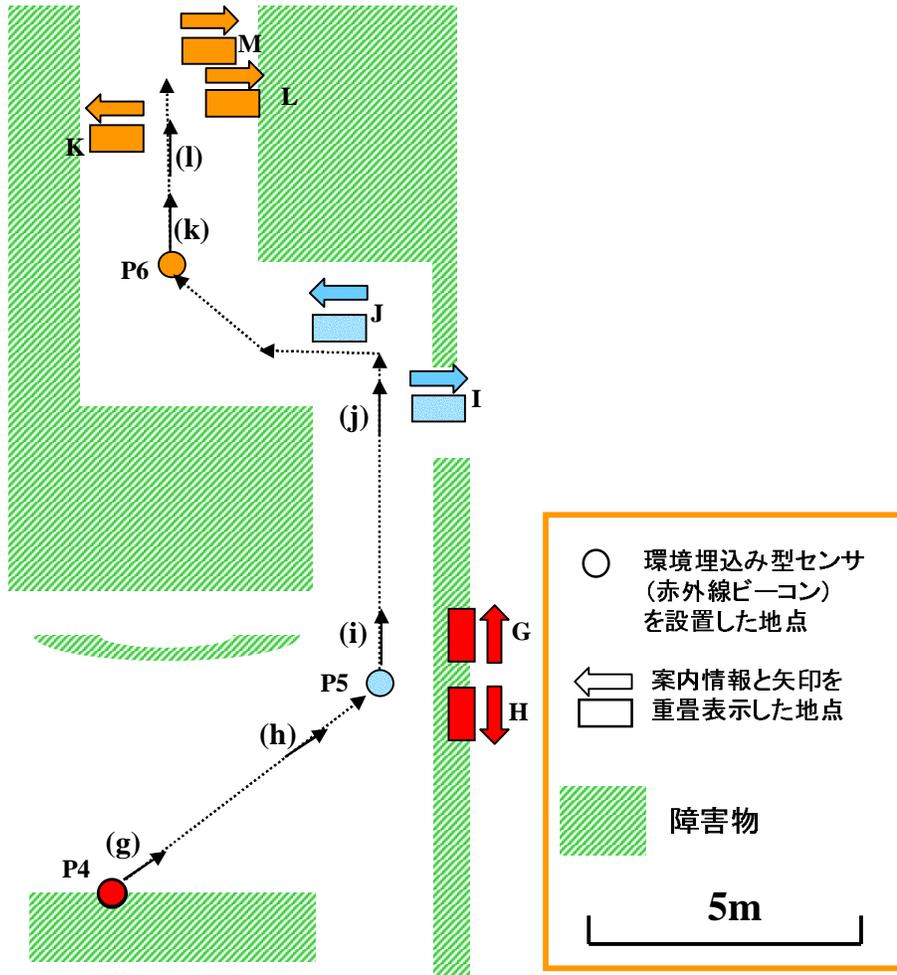


図 25 情報科学研究科 B 棟 3 階の様子



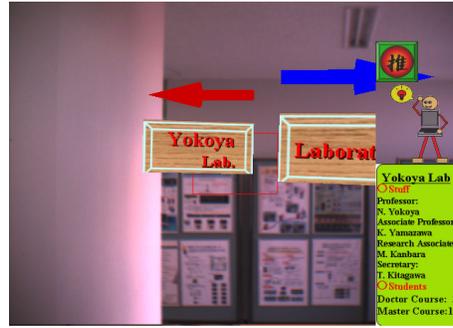
(g)



(h)



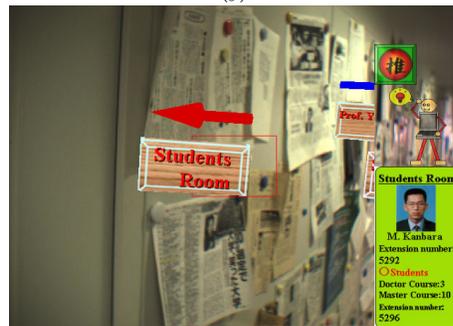
(i)



(j)



(k)



(l)

図 26 情報科学研究科 B 棟 3 階での注釈付加画像の例

ことを確認した。なお、注釈付加画像はユーザに毎秒約 25 フレームで提示された。また、提案システムはバッテリーにより 3 時間の連続作動が可能であることを確認した。

提案システムにおける問題点として、図 24 の (a) のように、ユーザと注釈情報の間に遮蔽物が存在するような場合は、注釈情報が遮蔽物の手前に表示され、ユーザが直感的に現実環境と注釈情報の対応付けができない注釈付加画像が提示されるという点が挙げられる。また、現状のシステムでは、ユーザは環境埋込み型センサの位置を知らなくてはならない。この問題に対しては、ユーザに環境埋込み型センサが設置されている位置を注釈として表示することで解決することが考えられる。

5. むすび

本論文では、環境埋込み型センサと歩数計測を利用したユーザの位置計測を併用したウェアラブル型注釈提示システムについて述べた。設置された地点の位置IDを持つ環境埋込み型センサには、RFID タグおよび赤外線ビーコン送信機を用い、それぞれ RFID タグリーダおよび赤外線ビーコン受信機を利用することで、位置IDの認識を行った。また、歩数計測に用いた歩数計はコンパスと加速度センサから構成され、コンパスでユーザの歩行方向を、加速度センサでユーザの歩数をそれぞれ計測し、ユーザの位置を推定した。また、学内での注釈付け実験により屋内・屋外環境で正しい位置に注釈情報を付加してユーザに提示できること、および屋内・屋外環境でシームレスに注釈情報の提示が行えることを示した。

提案手法によって、屋内・屋外でシームレスにユーザの位置を計測することが可能となった。環境埋込み型センサが配備された環境があれば、提案手法を用いることで、屋内・屋外を問わず位置に応じた注釈情報を現実環境の映像に合成してユーザに提示するウェアラブル注釈提示システムが実現できる。このようなシステムは、屋内・屋外にわたる施設や観光名所などの案内システムに発展させることが可能である。そのために本研究に残された課題を以下に挙げる。

1. 無線ネットワークの利用・注釈情報データベースの共有

無線ネットワークを用いて、サーバに保持されている注釈情報データベースを自動的に獲得することで、現状のシステムでは注釈情報データベースをあらかじめユーザが所持する計算機内に保持しておく必要があるという問題を解決することができる。また無線ネットワークを利用することの利点として、注釈情報データベースの更新が容易に行えることが挙げられる。これにより、時刻に依存するような注釈情報をユーザに提示することが可能になる。また、注釈情報データベースをサーバで管理し無線ネットワークで獲得することで、複数のユーザにより注釈情報データベースを共有し、ユーザがシステムを利用しながら注釈情報を追加し他のユーザがその情報を即座に参照する、といったことが可能となる。

2. 遮蔽問題の解決

実環境のおおまかな三次元モデルをデータベースに持つことにより、実物体との前後関係の整合性を考慮して注釈を配置することが必要であると考える。

3. システムの拡張性

環境中に新しく環境埋込み型センサを設置するとき、歩数計測によって新しく設置するセンサの位置を推定することが考えられる。その際、複数のユーザによる計測結果を利用して信頼性を上げることで、センサの位置を高精度に推定できると考える。

これらの課題を解決することで、提案システムを発展させて、より有用性の高い道案内および観光案内システムが実現できると考えられる。

謝辞

本研究の全過程を通して，懇切なる御指導，御鞭撻を賜った視覚情報メディア講座 横矢 直和教授 に心より深謝致します．

本研究の遂行にあたり，有益な御助言，御指導を頂いた知能情報処学講座 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，温かい御指導をして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御助言，御鞭撻を賜った視覚情報メディア講座 神原 誠之助手には厚く御礼申し上げます．また，物心両面において常に暖かい御支援を頂いた視覚情報メディア講座の諸氏に深く感謝致します．特に，幾度となく本研究の実験をサポートして頂いた牧田 孝嗣氏には深く感謝致します．

また，物心両面において常に温かい御支援を頂いた，視覚情報メディア講座 北川 知代女史に深く感謝します．

参考文献

- [1] S. Mann: “Wearable Computing: A First Step Toward Personal Imaging, ” IEEE Computer, Vol. 30, No. 2, 1999.
- [2] T. Starner, J. Weaver, and A. Pentland: “A Wearable Computer Based American Sign Language Recognizer, ” Proc. 1st Int. Symp. on Wearable Computers, pp. 199-202, 1997.
- [3] R. Azuma: “A Survey of Augmented Reality, ” Presence, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
- [4] M. Kourogi, T. Kurata, and K. Sakaue: “A Panorama-based Method of Personal Positioning and Orientation and Its Real-time Applications for Wearable Computers, ” Proc. 5th Int. Symp. on Wearable Computers, pp. 107-114, 2001.
- [5] K. Satoh, K. Hara, M. Anabuki, H. Yamamoto, and H. Tamura: “TOWN-WEAR: An Outdoor Wearable MR System with High-precision Registration, ” Proc. 2nd Int. Symp. on Mixed Reality, pp. 210-211, 2001.
- [6] A. State, G. Horita, D. Chen, W. Garrett, and M. Livingston: “Superior Augmented Reality Registration by Integrating Landmark Tracking and Magnetic Tracking, ” Proc. SIGGRAPH’96, pp. 429-438, 1996.
- [7] 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. 44-52, 1996.
- [8] 小田島 太郎, 神原 誠之, 横矢 直和: “GPSを用いた屋外で利用可能なウェアラブル型拡張現実感システム, ” 情報科学技術フォーラム (FIT) 一般講演論文集, Vol. 3, No. I-96, 2002.
- [9] 小田島 太郎, 神原 誠之, 横矢 直和: “拡張現実感技術を用いた屋外型ウェアラブル注釈情報システム, ” 信学技報, PRMU2002-181, pp. 73-78, 2003.

- [10] J. Loomis, R. Golledge, R. Klatzky, J. Speigle, and J. Tietz: "Personal Guidance System for the Visually Impaired," Proc. Int. Conf. on Assistive Technologies, pp. 85-90, 1994.
- [11] <http://www.media.mit.edu/>
- [12] T. Kurata, T. Okuma, M. Kouroggi, and K. Sakaue. "The Hand Mouse: gmm hand color classification and mean shift tracking," Proc. Int. Conf. of Computer Vision 2001, pp. 119-124, 2001.
- [13] N. Ukita, Y. Kono, and M. Kidode: "Wearable Vision Interfaces: towards Wearable Information Playing in Daily Life," Proc. 1st CREST Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing, pp. 47-56, 2002.
- [14] M. Lamming, and M. Flynn: "Forget-me-not Intimate Computing in Support of Human Memory," Technical Report EPC-1994-103, RXRC Cambridge Laboratory, 1994.
- [15] M. Billinghurst, S. Weghorst, and T. Furness : "Wearable Computers for Three Dimensional CSCW," Proc. 1st Int. Symp. on Wearable Computers, pp. 39-46, 1997
- [16] S. Julier, M. Lanzagorta, Y. Baillet, L. Rosenblum, S. Feiner, T. Höller, and S. Sestito: "Information Filtering for Mobile Augmented Reality," Proc. IEEE/ACM 1st Int. Symp. on Augmented Reality, pp. 3-11, 2000.
- [17] T. Ohshima, K. Satoh, H. Yamamoto, and H. Tamura: "AR Hockey: A Case Study of Collaborative Augmented Reality," Proc. Int. Conf. Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 1226-1229, 1998.
- [18] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Juriet, and B. MacIntyre, "Recent advances in augmented reality," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.21, No.6, pp.34-47, 2001

- [19] 田村 秀行, 大田 友一, “複合現実感,” 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.3, pp.266-272, 1998
- [20] P. Milgram and F. Kishino, “A taxonomy of mixed reality visual display,” IEICE Trans. Inf. and Syst. , Vol.E77-D, No.12, pp.1321-1329, 1994
- [21] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Seligmann: “Knowledge-based augmented reality,” Communications of the ACM, Vol. 36, No. 7, pp. 52-62, 1993.
- [22] H. Kato, and M. Billinghurst: “Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System,” Proc. IEEE/ACM 2nd Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94, 1999.
- [23] J. Rekimoto: “Matrix: A Realtime Object Identification and Registration Method for Augmented Reality,” APCHI '98, pp.63-68, 1998.
- [24] M. Bajura, and U. Neumann, “Dynamic registration correction in video-based augmented reality systems,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.15, No.5, pp.52-60, 1995
- [25] M. Kanbara, T. Okuma, H. Takemura and N. Yokoya: “A Stereoscopic Video See-through Augmented Reality System Based on Real-time Vision-based Registration,” Proc. IEEE Int. Conf. on Virtual Reality 2000, pp. 255-262, 2000.
- [26] S. You, and U. Neumann, “Fusion of Vision and Gyro Tracking for Robust Augmented Reality Registration,” Proc. IEEE Int. Conf. on Virtual Reality 2001, pp. 71-78, 2001.
- [27] 藤井 博文, 神原 誠之, 岩佐 英彦, 竹村 治雄, 横矢 直和: “拡張現実のためのジャイロセンサを併用したステレオカメラによる位置合わせ,” 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU99-192, 2000.
- [28] R. Tenmoku, M. Kanbara, N. Yokoya, and H. Takemura: “Annotation Overlay with a Wearable Computer Using Augmented Reality,” Proc. 1st

CREST Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing, pp. 27-32, 2002.

- [29] 天目 隆平, 神原 誠之, 横矢直和: “拡張現実感技術を用いたウェアラブル型注釈提示システム,” 信学総大, No. A-16-46, 2002.
- [30] 天目 隆平, 神原 誠之, 横矢 直和: “赤外線ビーコンと歩数計測を用いたウェアラブル型注釈提示システム,” 信学技報, IE2002-54, 2002.
- [31] 天目 隆平, 神原 誠之, 横矢 直和: “赤外線ビーコンと歩数計測を用いたウェアラブル型拡張現実感のための幾何学的位置合わせ,” 情報科学技術フォーラム (FIT) 一般講演論文集 , Vol. 3, No. K-32, 2002.
- [32] 天目 隆平, 神原 誠之, 横矢 直和: “赤外線ビーコンと歩数計測を利用したウェアラブル拡張現実感システム,” 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, No. G14-10, 2002.
- [33] S. Feiner, B. MacIntyre, T. Höller, and A. Webster: “A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment,” Proc. 1st Int. Symp. on Wearable Computers, pp. 74-81, 1997.
- [34] T. Höller, S. Feiner, D. Hallaway, and B. Bell: “User Interface Management Techniques for Collaborative Mobile Augmented Reality,” Proc. 1st CREST Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing, pp. 17-25, 2002.
- [35] T. Gleue, and P. Daehne: “Design and Implementation of a Mobile Device for Outdoor Augmented Reality in the ARCHEOGUIDE Project,” Proc. VAST’01, pp. 28-30, 2001
- [36] P. Daehne, J. Karigiannis: “ARCHEOGUIDE: System Architecture of a Mobile Outdoor Augmented Reality System,” Proc. 1st Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 263-264, 2002.

- [37] 蔵田 武志, 大隈 隆史, 興梠 正克, 加藤 丈和, 坂上 勝彦: “VizWear: コンピュータビジョンとウェアラブルディスプレイによる人間中心インタラクション,” 高臨場感ディスプレイフォーラム 2001, pp. 47-52, 2001.
- [38] 興梠 正克, 蔵田 武志: “ウェアラブルカメラと慣性センサ群のデータ統合に基づくパーソナルポジショニング,” 信学技報・第12回複合現実感研究会, PRMU2002-180, pp. 67-72, 2003.
- [39] B. H. Thomas, V. Demczuk, W. Piekarski, D. Hepworth, and B. Gunther: “A Wearable Computer System With Augmented Reality to Support Terrestrial Navigation,” Proc. 2nd Int. Symp. on Wearable Computers, pp. 168-171, 1998.
- [40] W. Piekarski, and B. Thomas: “Bread Crumbs A Technique for Modelling Large Outdoor Ground Features,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality, pp. 269-170, 2002.
- [41] S. Lee, and K. Mase: “A Personal Indoor Navigation System Using Wearable Sensors,” Proc. Int. Symp. on Mixed Reality, pp. 147-148, 2001.
- [42] S. Lee, and K. Mase: “Incremental Motion-based Location Recognition,” Proc. 5th Int. Symp. on Wearable Computers, pp. 123-130, 2001.
- [43] 興梠 正克, 蔵田 武志, 坂上 勝彦: “ウェアラブルシステムのためのビューベースな位置・方位取得手法,” 信学技報 PRMU2001-226, 2002.