

遠隔協調作業支援のための位置姿勢計測とインタフェース技術

Personal Positioning and Interface Technologies for Supporting Remote Collaborative Works

蔵田 武志 産業技術総合研究所
Takeshi Kurata National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
t.kurata@aist.go.jp, http://staff.aist.go.jp/t.kurata/

興梠 正克 (同上)
Masakatsu Kourogi m.kourogi@aist.go.jp, http://staff.aist.go.jp/m.kourogi/

大隈 隆史 (同上)
Takashi Okuma takashi-okuma@aist.go.jp, http://staff.aist.go.jp/takashi-okuma/

Keywords: personal positioning, wearable visual interface, augmented reality, tangible tabletop interface, remote collaborative work, CSCW

1. はじめに

近年、国や自治体、企業などあらゆる組織の活動において、ガバナンス・リスク・コンプライアンス (GRC) 要件への対応が強く求められている。多くの業務は、人と実世界 (自然、人工物) とのインタラクション、(しばしば遠隔地の) 人と人とのコミュニケーションの中で遂行され、移動と作業の繰り返しを伴うことも少なくない。そのような中で、業務を効率化しつつ GRC 対応していくには、刻一刻と変わる作業従事者の状況把握や、作業場所や作業段階ごとの、的確でわかりやすく、さらに煩わしさの少ない作業支援サービス提供を可能にする遠隔協調作業支援技術が必要不可欠である。

本稿では、そのような遠隔協調作業支援に欠かせない人の位置・行動計測技術、及びヒューマンインタフェース技術についての研究開発事例や筆者らの取り組みについて紹介する。まず次節では、汎用的な測位技術や人に特化した位置・姿勢計測技術について概説する。次に、作業側ウェアラブルインタフェース、及びそれらウェアラブルインタフェースを装着した複数作業従事者への遠隔指示のための指示側インタフェースに関する筆者らの取り組みについて、それぞれ3節、4節で紹介する。最後に5節でまとめと今後の展望について述べる。

2. 作業者の位置姿勢計測

2.1. 測位手法の特徴

人間の位置計測を実現するために、下記を含むさまざま

な手法について活発な研究開発が実施されている。

- (1) GPS(Global Positioning System)のように複数の軌道衛星を用いる手法
- (2) 超音波、電波(RF, UWB)、Wi-Fi、光通信などのユビキタスセンシングを用いる手法 (本稿では便宜上 LPS: Local Positioning System と呼称)
- (3) 画像の幾何学的位置合わせや認識手法
- (4) デッドレコニング (マップマッチングを含む)
- (5) (1)~(4)の統合手法

カーナビと共に既に一般に普及している GPS は、携帯電話への GPS 搭載義務化の世界的な流れや、ポータブルナビ市場の拡大などもあり、これからも測位手段として重要な役割を果たすと考えられる。DGPS や RTK-GPS [14]、さらに、それらとインターネットとの組み合わせなど、より高精度なシステムも提案されている。GPS の利点としては、広大な屋外空間をカバーしているにも関わらず、インフラ整備や運用コストを (少なくとも) 利用者側は考えなくてよい点などがあげられる。問題点としては、高層建築物、木陰、屋内など空が遮蔽された場所では使えないこと、伝達遅延やマルチパスなどの精度への影響が大きいことなどがある。遮蔽に関しては、衛星と同じ信号をスードライト (擬似衛星) と呼ばれる装置を局所的に設置して提供することにより、利用者側の装置を変更せずに測位可能な範囲を拡大することも試みられている。しかしながら現状では、マルチパスの影響はやはり避けられず、また、インフラ整備・運用コストの問題が新たに発生する。



図1 国際会議 (ISMAR2007) で実施した屋内外測位デモ

(2)の LPS の場合、送信機と受信機のセットでシステムを構築し、三辺測量の原理や、単なる ID 検知 (ID と離散的な位置情報とが対応) に基づくことによって測位が実現される。GPS も送信機 (衛星) と受信機のセットで成り立っているが、高々30 個前後の衛星を配置することにより地球規模の測位可能としているのに対し、LPS では、測位サービスを提供しようとする場所に多くの装置を設置し、運用コストを継続的にかけていく必要があり、しかも利用者側の装置の業界標準が定まっていないという問題点がある。なお、UWB はマルチパスにも比較的強いとされ、今後の測位の高精度化が期待される。

LPS の中で最も実用化が進んでいるのは Wi-Fi を用いる手法である。コンシューマ用途に適したものとしては、PlaceEngine[1]のように都市部を中心に遍在している Wi-Fi 基地局情報を収集し利用する方法がある。また、日本エアロスカウト社と NEC ネットエスアイ社は防爆構造規格に適合した Wi-Fi タグを開発しており、爆発性ガスの存在する場所においても、業務効率化、安全管理強化、有事時の作業員位置検知、危険物の搬出・搬入状況管理などを可能としている[2]。

(3)の画像を用いた手法[3]では、カメラとマーカーとのペアによって ID、位置、向きを求めるもの、データベースに蓄積された撮影位置の既知な画像群と入力画像とを比較して位置と向きを求めるもの、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術等によって、周囲の作業環境の 3 次元構造を復元しながらカメラの 3 次元運動を求めるものなどがある。また、画像中には利用者 (作業員) の手の動きや会った人なども含まれるため、潜在的には今後、より高度な状況把握機能が実現、提供される可能性がある。

2.2. デッドレコニングに基づく手法

歩行者の移動速度・範囲に見合った縮尺・粒度で作業支援サービスを提供するには、高精度な位置情報が要求さ

れる上、的確なコンテンツ選択や情報の可視化のためには、向きの情報も必要不可欠となる。さらに、それらの履歴は、作業従事者の行動のトレーサビリティ確保に有効であり、作業中の手抜きや不正行為等の社会問題の軽減にも寄与する。

(4)のデッドレコニングでは、自蔵センサ群 (加速度、角速度、磁気、気圧等) によって作業員の主に歩行動作を検出、積算し、位置や向きを逐次更新する。また、歩く、走る、座る、エレベータに乗るなどの動作種別などを推定するものもある。さらに、マップマッチングとの併用により精度を向上させることもできる。

図 1 は筆者らが開発中のデッドレコニングシステム [4][5]を用いて屋内外を歩き回った際の測位結果である。この例では、インフラを整備することなく、デッドレコニングとマップマッチング (移動可能範囲を用いた制約、階段の昇り降り動作と階段位置との対応付け) により屋内外測位を実現している。GPS の場合 (実際、GPS も備えていた)、屋内から屋外に出て GPS 受信機が衛星からの信号を捕らえはじめてから測位結果を得るまでには待ち時間 (十数秒から数十秒) が発生するが、デッドレコニングの場合はそのような問題はなくシームレスに測位結果を提供することができる。

なお、GPS 信号にスクランブルを掛けるのと同じ意味合いだと考えられるが、現在、ハネウェル社のデッドレコニングモジュールの最上位機種は米国の輸出規制対象となっている[6]。また、トキメック社で開発された高精度 MEMS 慣性センサなどの登場により、デッドレコニング性能はさらに向上すると考えられ、この分野の動向が注目される。

ただし、デッドレコニングの性能がいくら向上しても累積誤差を取り除くことは困難であり、また、絶対位置を与える必要があるため、通常は(1)~(3)とデッドレコニングとを相補的に組み合わせた統合手法を適用することになる。このような組み合わせでは、デッドレコニングによって過度にインフラに依存することがなくなるため、例えば、LPS で必要とされる装置の設置密度を低く抑えることができるようになる。また、画像ベースの手法の場合は、登録データ数を削減することができる。

今後はユビキタス情報社会を如何にサステナブルに構築していくかがより一層問われるため、(5)の統合手法のような、インフラ構築・運用コストやシステム全体のエネルギー消費を抑えながら、位置や向き、さらにそれらの履歴に基づく情報サービスを広範囲に提供できる技術への期待がより高まっていくものと考えられる。

3. 作業員側インタフェース

3.1. デッドレコニング応用事例

本節ではまず、デッドレコニング技術を応用した作業支援インタフェースの研究開発事例をいくつか紹介する。



図2 ウェアラブル機器を利用した科学館学習支援システム

筆者らは、科学技術館（北の丸公園、5階建て、各階2,500～2,700 m²）において、平成18、19年度に各4日間ずつモバイル学習支援システム実験を実施した [5]。平成19年度のシステム外観と、移動や学習作業支援のためのコンテンツの一部を図2に示す。本実験では、のべ40名以上の被験者が、測位結果を利用した3次元インタフェースの有用性・使用感の主観評価を行い、デッドレコニング技術に基づくシステムの実運用における頑健性や精度についても調査された。さらに筆者らは、タブレットPCや図2と同じ測位システムを用いた追体験システムを開発した（図3）。社会学者やサービス工学研究者などがユーザとして想定されるこのシステムにより、ユーザの位置・姿勢やそれらを組み合わせた行動パターンをキーとする直感的で臨場感の高い検索が可能となる。

図4は、防衛省技術研究本部の研究試作事例として公開された先進個人装備システム[15]の外観（左）、HMD（ヘッドマウントディスプレイ）中の映像（右上）、バックパックの中身（右下）を示している。バックパックには、ウェアラブルPCや無線通信装置、バッテリー等のほかにデッドレコニングモジュールが搭載されている。通常の歩行だけではなく、匍匐や中腰などの動作も認識でき、災害救援活動や自衛活動のような状況を想定した開発が行われている。富士通社においても災害救援や警察、消防などの活動支援を目指し、腰部に装着するデッドレコニングモジュールの研究開発を実施している。また、澁谷工業社においては、ハンドヘルド端末を持った操作者の位置や向きに応じた操作対象の自動切り換え、安全確認、行動履歴によるトレーサビリティ確保等を目的とし、デッドレコニングとLPSとを統合したポータブル操作システムの開発を進められている。

3.2. ウェアラブルビジュアルインタフェース

作業側インタフェースには、コンピュータが映像や音声、センサデータから自律的に作業従事者の状況を把



図3 追体験ブラウザと現地での追体験の様子

握することで作業支援を実現する着用型アシスタント的なものと、指示者やオペレータが遠隔地の状況を理解し、的確な指示を作業従事者に提示する遠隔協調作業支援システム的なものが考えられる。

前者については、実用段階とは言えないものが多いものの既に研究開発報告が盛んになされている。一方、後者のウェアラブル遠隔協調作業支援システムの場合、物体認識や状態遷移の把握といった複雑な問題をコンピュータに解かせる必要が必ずしもないため、ここ数年、発電プラント、石油プラント、清掃プラント、工場、通信網工事、流通などで実際に運用されはじめています。

筆者らが提案したWACL (Wearable Active Camera with Laser pointer, 図5右上) インタフェースは、カメラとレーザポインタを一体化したヘッド部を小型のパン・チルトアクチュエータ上に搭載し、ハンズフリー、アイフリーで頭部非拘束という特徴をもつ。遠隔の指示者がこのWACLを操作することにより、作業側（着用者）の姿勢変化にあまり影響されずにその作業状況を観測することができる。さらに、レーザポインタで作業対象や進むべき方向を直接指し示しながら作業側と対話することが可能である。さらに、モーションセンサデータや、画像のアフィン変換による位置合わせ結果に基づくスタビライズ機能を用いることにより、着用者が体を動かして



図4 防衛省技術研究本部平成19年度研究発表会に出展された先進個人装備システム

もカメラ・レーザヘッド部の向きをある程度安定させることができる。

実作業環境における協調作業では、作業は主に“対象物・場所の特定”、“手順の説明”、“理解の確認”の3段階に分類される。HMD (Head Mounted Display) と HMC (Head Mounted Camera) からなる従来型のヘッドセットと WACL とを比較したユーザテストにおいて、WACL は作業者に優れた印象を与える一方で、レーザポインタの表現能力の低さから“手順の説明”が複雑な場面においては作業時間を増加させることが判明した[8]。WACL ユーザに CWD(Chest worn display)などの付加的なディスプレイ装置を装着することで、この問題が軽減されるという結果が別のユーザテストにより得られているが、作業対象から視線をしばしば外す必要があるため抜本的な解決策とは言えない。そこでさらに、レーザプロジェクタ、高精細広角カメラ、慣性センサから構成される BOWL ProCam (BOdy-Worn Laser Projector Camera)も提案されている(図6)。

4. 指示者側インタフェース

4.1. 指示者側の問題

従来の遠隔作業支援システムの多くは遠隔会議向けであり、実作業向けではない。また、十分な数の熟練労働者を育成し、彼らが必要とされるすべての所に配置するには、団塊の世代問題を引き合いに出すまでもなく非常に高いコストが必要となる。しかしながら、従来の遠隔作業支援システムの多くは指示者と作業者の数的不均

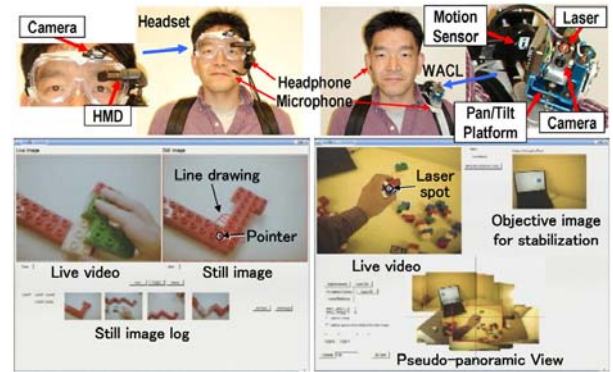


図5 WACL と従来型ヘッドセットとの比較

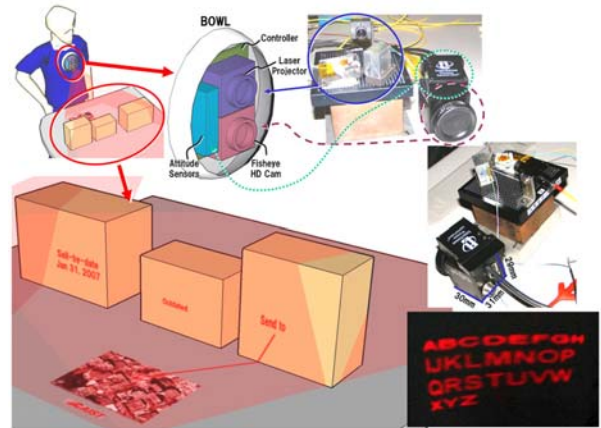


図6 BOWL ProCam のイメージ図と試作中のデバイス

衡についてあまり考慮していない。例えば、指示者と作業者が一対多という状況に対応するために指示者側のディスプレイを大型化し GUI を多機能化していくと、GUI オブジェクト(ウィンドウ)間のフォーカス切り替えなどのために作業時間が増加したり、多機能化が誤操作を誘発したりするなどの問題が発生する。

このような問題に対し、筆者らは実物体による具現とデジタル表現とを結合することにより直感的な入出力機能を実現するタンジブルユーザーインタフェース(TUI)[10]に着目した。TUI を遠隔協調作業に適用すると、例えば、作業者やキーボードをタンジブルアパタやタンジブルツールに結び付けて操作することができる。

4.2. タンジブルテーブルトップインタフェース

筆者らが開発しているタンジブルテーブルトップインタフェース(TTT)[11][12]は、テーブルトップタッチスクリーンディスプレイ、その上に置かれる複数の物理“タグ”からなる。各タグには GUI オブジェクトが対応付けられており、タグを移動させるとその GUI オブジェクトも追従して移動する。指示者は作業者から送られてくるライブ映像により遠隔地の状況把握をするとともに、そのライブ映像やマニュアルからコピーした静止画に対し、タッチスクリーンで指示内容を描画し作業者に送る

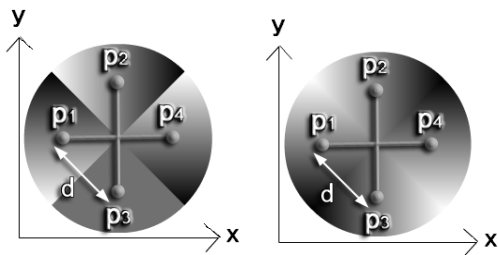


図7 4つの光センサで平行移動と回転の計測ができるマーカパタンの例

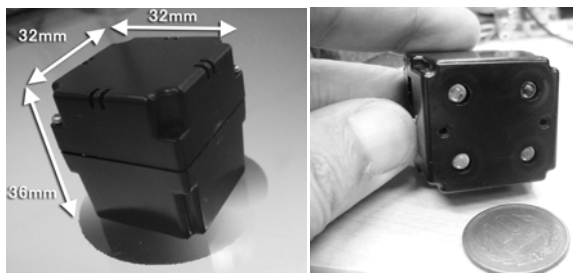


図8 光センサ、加速度センサ、ジャイロ、Zigbee モジュールからなる無線タグ（上）と第2世代 TTT（下）

ことができる。一般に両手を使った操作は TUI に備わる優れた特徴の1つであるが、この TTT インタフェースで注目すべきは、例えば、利き手で注釈を描画しながらもう一方の手でタグを把持するといった自然な非対称両手操作が自発的に促されることである。

第1世代 TTT では、タグの動きの計測に超音波を用いていた[11]。この方式では、タグ上部に組み込まれた超音波トランスミッタから、ディスプレイ上方に設置された複数のレシーバに向けて超音波が発信される。この超音波の飛行時間を用いて多辺測量することで、各タグの3次元絶対位置を計測していた。この計測方法は、TTT のコンセプトを実証するには十分な精度を有しているが、時分割方式であるために計測レートが必ずしも十分ではない上、マルチパスなどの外乱を平滑化する必要があるために、ウィンドウがタグに追従して動く際に若干の遅

れが生じてしまうという問題がある。また、タグの回転を計測できず、インタラクション技法の自由度を制限する要因となっていた。さらに、超音波レシーバが必要であることから、システム構成を簡素化することとも難しく、ユーザの手がタグとレシーバの間を遮断すると、計測自体が困難となるという問題もあった。

筆者らは光センサと加速度センサを併用してタグの動きを計測する新しい手法を提案し、第2世代 TTT で採用した[12]。本手法は、杉本らの手法[13]を TTT に応用し、タグに内蔵した光センサと加速度センサを相補的に用いて、タグの位置・回転を計測するものである。さらに、光センサによって観測されるディスプレイ上のマーカパターンを改良し、計測のロバスト化とマーカパタンの小型化を実現した。

従来手法では、5つの光センサでディスプレイ面上の平行移動と回転、外乱の4変数を計算するものであったが、センサや計算方法が冗長であった。筆者らが考案した図7に示すマーカパターンでは、使用する4つの光センサで同等の計測が行うことができる。これにより、マーカパタンの面積を65%に、光センサを組み込んだタグの底面積を50%にすることができる。

光センサ、加速度センサ、ジャイロ、Zigbee モジュールからなる無線タグのプロトタイプを図8（上）に示す。この無線タグを複数使って、図8（下）にあるように各作業員インタフェースからの映像や3次元地図などを見ながら直感的に指示者側インタフェースを操作するためのインタラクション技法についても開発を進めている。これにより、各作業員の状況把握、指示対象の1人または多数の作業員の選択、状況に合わせた適切な作業指示コンテンツ作成、適切なタイミングでの指示送信などの各機能を、指示者が簡単に使いこなせるようになることが想定されているが、他の形態のインタフェースとの比較や実証などは今後の課題である。

5. おわりに

本稿では、遠隔協調作業支援に有効な作業従事者の位置姿勢計測技術、及びヒューマンインタフェース技術についての事例や筆者らの取り組みについて紹介した。それらの多くは技術的には実現性は高いが、今後はより綿密な有効性の評価が必要となってくるであろう。また、現状においては、業務効率化と GRC 要件対応とを、特にコスト的な面で両立していくことは難しい。そのため、例えば、保険制度や認証制度を整備し、先端的なセンシングシステムやインタフェースの導入を促進するなどの取り組み等が望まれる。

参考文献 ◇

- [1] PlaceEngine, <http://www.placeengine.com/>
 [2] 日本エアロスカウト社, <http://aeroscout.co.jp/>

- [3] 蔵田武志, ウォルテリオ・マヨール, ウェアラブルビジュアルインタフェースのためのコンピュータビジョン, 電子情報通信学会 PRMU, HIP 研究会, 日本 VR 学会第 19 回複合現実研究会, 情報処理学会 CVIM, PRMU2005-144 及び HIP2005-114, pp.43-50/2006-CVIM0152-7, pp.45-52 (2006)
- [4] T. Okuma, M. Kourogi, N. Sakata, T. Kurata. A Pilot User Study on 3-D Museum Guide with Route Recommendation Using a Sustainable Positioning System. In Proc. International Conference on Control, Automation and Systems 2007 (ICCAS 2007), pp.749-753.
- [5] M. Kourogi, N. Sakata, T. Okuma, T. Kurata. Indoor/Outdoor Pedestrian Navigation with an Embedded GPS/RFID/Self-contained Sensor System. In Proc. International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2006), pp.1310-1321.
- [6] ハネウェル社 DRM,
<http://www.magneticsensors.com/products.html#DRM>
- [7] 蔵田武志, 酒田信親, 葛岡英明, 興梠正克, 大隈隆史, 西村拓一, 遠隔協調作業のためのウェアラブル・タンジブルインタフェース, SICE 第 69 回パターン計測部会研究会, pp.11-18 (2006)
- [8] T. Kurata, N. Sakata, M. Kourogi, H. Kuzuoka, M. Billinghamurst. Remote Collaboration using a Shoulder-Worn Active Camera/Laser. In Proc. IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC2004), pp.62-69.
- [9] T. Kurata, N. Sakata, M. Kourogi, T. Okuma, Y. Ohta. Interaction using nearby and far projection surfaces with a body worn ProCam system. In Proc. The Engineering Reality of Virtual Reality, the 20th Annual IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging (EI 2008), 6804-16.
- [10] H. Ishii, B. Ullmer. Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In Proc. CHI, pp. 234-241 (1997)
- [11] U. Kawamoto, T. Kurata, N. Sakata, T. Okuma, H. Kuzuoka. Tangible Tabletop Interface Based on Position/Orientation Measurement of Tags Using Photo Sensors and Accelerometers. In Proc. The 2008 IEEE International Conference on Distributed Human-Machine Systems (DHMS 2008)
- [12] T. Kurata, T. Oyabu, N. Sakata, M. Kourogi, H. Kuzuoka. Tangible tabletop interface for an expert to collaborate with remote field workers. In Proc. CollabTech 2005, pp. 58-63.
- [13] M. Kojima, M. Sugimoto, A. Nakamura, M. Tomita, H. Nii and M. Inami, Augmented Coliseum: An Augmented Game Environment with Small Vehicles, First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems, pp.3-8 (2006)
- [14] 安田明生, GPS の現状と展望, 電子情報通信学会誌, Vol.82 No.12, pp.1207-1215 (1999)
- [15] 防衛省技術研究本部先進技術推進センター,
<http://www.mod.go.jp/trdi/research/center.html>