PARTNER: 人間とロボットの相互の作業教示を支援するプロジェクタベースト AR - 人間作業の支援 -

山下 雅也 *　　坂根 茂幸
中央大学大学院理工学研究科

PARTNER: Projector-based AR for teaching new tasks between human and robot - Assistance in human tasks -

Masaya YAMASHITA*　　Shigeyuki SAKANE
Chuo University　Graduate School of Science and Engineering

Abstract - A human-robot interface system, PARTNER, is under development that takes into account the flexibility of augmented reality approach. The prototype consists of a projector subsystem for information display and a real-time tracking vision subsystem to recognize the human's action. This paper presents an annotation function which guides and assists in human operator's task using the rangefinder capability. We will show preliminary results of the function in an unfolding task of a portable OHP device.

Key Words: human-robot interface, augmented reality, annotation, rangefinder, projector

1　はじめに

次世代ロボットシステムの応用範囲を拡張するために，ヒューマン・ロボットインタラクションをさまざまなレベルで発展させ，より使い易く，親しみやすいシステムに改良する必要がある．

ヒューマン・コンピュータインタフェースの分野では，実環境のマルチ - モーダル情報を統合することによって，人間の日常生活を情報強化することが可能な Augmented Reality システム [1][3] と Mixed Reality システム [4] が注目を集めている．そのアプローチはヒューマン・ロボットインタフェースの発展の指針を示している．我々は AR アプローチ，特に DigitalDesk[2] の柔軟性を考慮に入れたヒューマン・ロボットインタフェースシステム，PARTNER(Projector-based AR for Teaching NEw tasks between human and Robot) を構築してきた．プロトタイプは情報ディスプレイのためのプロジェクタサブシステムと環境および，オペレータである人間の行動を認識する実時間トラッキングビジョンサブシステムから構成される．

PARTNER の開発において，現在までに 3 つのインタラクション機能，Virtual Operational Panel(VOP)，Interactive Image Panel(IIP)，Interactive Hand Pointer(IHP)[5][6] を構築してきた．これらの機能は基本的にロボットタスクを教示するために使われる．本論文では，図 1で示しているように，対照的な第 4 の機能である Adaptive Annotation Function(AAF) について述べる．AAF を用いることにより，タスクに応じて変化する状況を認識し，プロジェクタのアノテーションを通して人間の作業を教え，支援することができる．

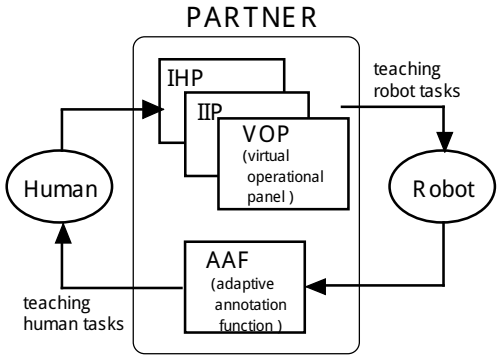

Fig.1: Adaptive Annotation Function and other modules in PARTNER

2　従来の研究

生産，修理における人間のタスク支援を目的とした AR システムがいくつか構築されているが，その多くが see-through head mounted displays(HMD) かモニタディスプレイを使用している．

Feiner らはレーザープリンタの保守のためにエンドユーザーを支援する AR システム，KARMA を構築した [7]．このシステムでは HMD を使用し，ユーザーがプリンタの（ワイヤーフレーム状の）3 次元幾何モデルを実物に重ね合わせる様に表示し，さらに操作対象のカートリッジと給紙を配置，確認できる．実際のプリンタの上でパーツの作業による動きとその目標状態を重ね合わせることにより，ユーザーにとって必要

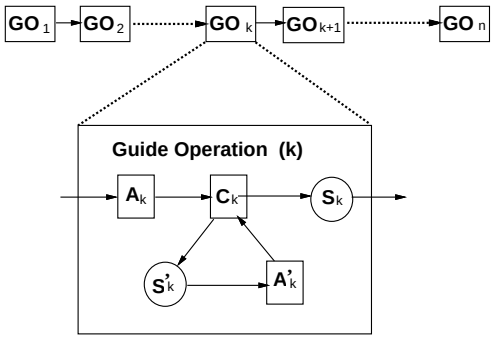

Fig.2: State transition diagram of guiding operations and adaptive annotations (GO_k:guide operation, A_k:annotation, C_k:check of status, S_k:status)

な操作の理解が容易になる．しかし，HMD を使用するとユーザーの頭の位置がプリンタに対して変化する．そのため，リアルタイムに実際のオブジェクト上での 3 次元モデルを正しく重ね合わせるためには，頭の位置を追跡しなければならない．

Caudell と Mizell は飛行機の結線作業をする際の技術支援のための HMD を用いる AR システムを開発した [8]．このシステムは結線すべきワイヤーのみをディスプレイに表示して情報提供し，作業効率に成果をあげているが，作業を行なう際には HMD を装着する必要がある．

伴らは電子パーツの検査作業を支援する AR システムを構築した [9]．ビジュアルマーカー，ビジュアルコマンド，バーチャル手法を電子ボード上に重ねた．それらは HMD のかわりにモニタディスプレイとハーフミラーを使用し，実際の電子ボードの上にディスプレイのスクリーンイメージを重ね書きしている．そのため，ユーザーの頭の位置はディスプレイとミラーによって拘束される．

DigitalDesk はプロジェクタタイプの AR システムのよく知られた例である．このシステムは人間のデスクワークをバーチャル計算機，バーチャル描画の投影によって支援し，人間のジェスチャを監視した．また，佐藤らは電子サーキットの組み立て作業を支援するシステムを開発した [10].

3 Adaptive Annotation Function of PARTNER

上記の AR ベーストアノテーションシステムとは対照的に，我々が提案するシステム (PARTNER/AAF) は以下の特徴を持つ．

1. PARTNER はプロジェクタを使用するため，see-through HMD のようなヘッドギアを装着する必要がない．システムは複数のユーザーにアノテーションを示すことに適する．

2. 作業環境の幾何学的変化とユーザーのアクションの両方を観測するため，状況に応じたアノテーションを利用できる．状況に応じたアノテーションを生成するために図 2で示す状態遷移図を用いる．

3. システムは環境の幾何学変化の調査のためのレンジファインダ機能を使用する．PARTNER の構成要素がプロジェクタサブシステムとビジュアルトラッキングシステムであるため，ハードウェアを付加せずにランダムドットステレオレンジファインダやスリット光レンジファインダなどの内蔵された投光型レンジファインダ機能を使用できる．

4. ユーザーのタスクの知識の違いにより，誤操作するかもしれない．そこで，作業において人の行動を監視をすることで，アノテーションシステムがユーザーに応じて機能する．たとえば，操作の仕方に戸惑う初心者に対して，システムはさらに注意を促すアノテーションを生成する．これにより，システムは柔軟なガイドが提供できる．

5. システムは人の手の行動を信頼性よく調査し，監視するために赤外線カメラを使用する．赤外線画像は背景のちらつき，色変化，テクスチャに対してロバストである．

以下の実験において，人間によるポータブル OHP(Over Head Projector) 装置の組み立て作業の支援例を示す．PARTNER/AAF は実環境において実際のオブジェクトを使い，仮想的でインタラクティブな操作案内を提供する．

4 プロトタイプシステム

4.1 ハードウェアとソフトウェア

図 3はプロトタイプシステムのハードウェアを示している．カラートラッキングビジョン装置 (TRV-CU, Fujitsu)[11] はブロックマッチングアルゴリズムに基づいてテンプレートイメージをリアルタイムにトラッキングする．テレビ信号の 1 フレーム内で 8×8(pixels) のサイズのテンプレートイメージを約 500 回トラッキングが可能である．作業環境の実際のイメージを CCD カメラ (XC-333, SONY) を通して取り込む．このカメラはオブジェクトを集中させ，作業環境の幾何学変化を調べるための投光型レンジファインダシステムのために使う．二つの赤外線カメラ (UR-U300M1, Mitsubishi) はユーザーの手の動作監視のために使う．

LCD(liguid crystal device) プロジェクタは VOP と IIP の仮想操作パネル，IHP のマーク，AAF のアノテーションの投影によってユーザーに情報を提供する．プロジェクタの解像度は 800×600(pixels) であり，出力輝度は 500 ANSI lumen である．プロジェクタはワークステーション (Ultra5, Sun) の X-window サーバによるディスプレイ画面を投影する．

システムのソフトウェアは電子総合研究所でロボット応用のために開発されたオブジェクト指向言語である EusLisp[12] を用いている．EusLisp は Lisp 関数として X-window ライブラリ機能を呼びだし，デバイスのライブラリ機能の統合を実現させる．

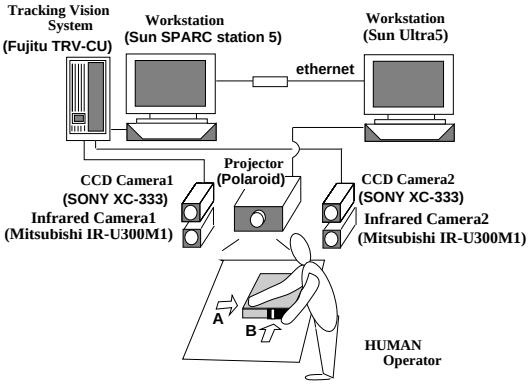

Fig.3: The prototype system

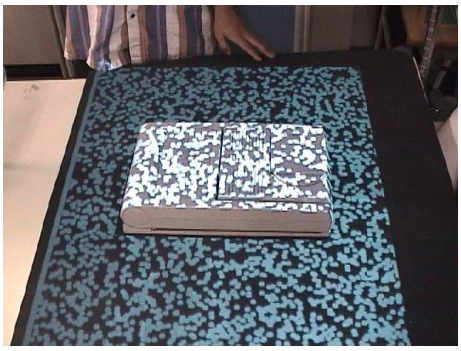

Fig.4: A scene of 3D measurement using the random-dot stereo

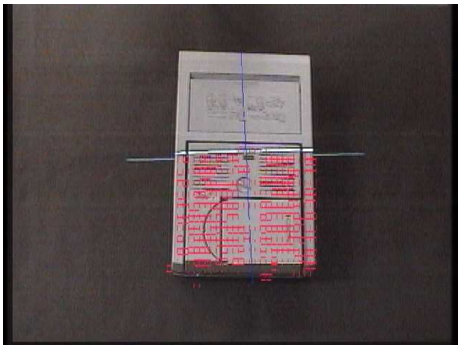

Fig.5: A scene of 3D measurement using the light-striped rangefinder (The principal axis is superimposed on the image.)

4.2 PARTNER によるアクティブレンジファインダ

AAF を実行するために作業環境とユーザーのアクションの変化を監視しなければならない．作業支援対象物や環境の計測のため，現在の PARTNER の構成要素であるプロジェクタとビジョンシステムを用いて，ランダムドットステレオレンジファインダとスリット光レンジファインダを実装している．レンジファインダの主な使用は以下のようになる．

1. ランダムドットステレオを用いて作業環境の 3 次元情報をラフに抽出し，対象物の主軸を決定する．
2. より正確に 3 次元データを計測するために，主軸方向と垂直になるようにスリット光を走査する．

この計測に基づいて対象物の 3 次元モデルの当てはめを行なう．

4.2.1 ランダムドットステレオ

ステレオビジョンにおける問題の一つは左右カメラ画像の対応点を正確に見つけることである．環境に対してランダムドットを投影することで，画像の特徴を付加し，ステレオ探索の誤対応を減少させることができる．本システムでは，四角形のテンプレートサブイメージを右側の画像内で定義し，左側の画像内から相関演算によってテンプレートを探索する．入力画像のサイズは 640 × 480(pixels) であり，テンプレートサイズは 4 倍に間引きした 32 × 32(pixels) である．左側画像の探索領域のサイズは 69 × 49(blocks) である．領域内の相関の良い配列要素を領域に分割して，ラベル付けする．図 4はランダムドットレンジファインダの実行場面の例である．

4.2.2 スリット光レンジファインダ

本システムのスリット光レンジファインダはランダムドットレンジファインダより正確な計測ができ，画像内で局所領域における探索が行なえる．スリット光の位置決めのために方向が 0, 45, 90, 135 ° である 4 種類のテンプレートを使用する．スリット光の位置，方向，長さ，幅がソフトウェアによりコントロールできるため，それに応じて環境にスリット光を投影することができる（図 5）．たとえば，ランダムドットの結果を用いることで対象物の周辺領域に探索領域を制限できる．

計測前にプロジェクタとカメラの両方をステレオ計測のためにキャリブレーションを行なっている．プロジェクタの幾何モデリングでは，焦点の位置，光軸の方向，スケールによる 7 つのパラメータによる透視変換を用いた．

5 ポータブル OHP 装置の組み立て作業のガイド実験

ポータブル OHP 装置の組み立て作業では，初心者にとって，ユーザーマニュアルの利用がなければ難しい作業となり得る（図 6）．提案するシステムの評価としてこのタスクを実験対象とする．

組み立て作業のための adaptive annotation を含むガイドオペレーションの状態遷移図（図 7）を使用する．各ガイドオペレーション GO_k は初期アノテーション A_k によって始め，タスク状態のチェック（監視）を行なう．もし期待する状態

Fig.6: Unfolding of a portable OHP device is a difficult task for a new user without consulting the manual.

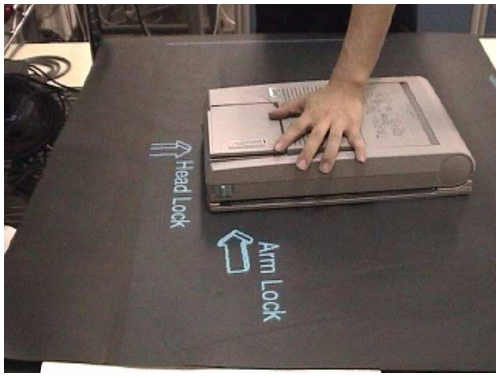

Fig.7: An example of annotation to guide the unfolding task

に至れば，状態S_kに移る．さもなければ，望ましい状態へ導き，また，ユーザーの誤操作を警告するために第2のアノテーションが生成される．

組み立て作業は次の段階を必要とする．

(1) head-lock レバーを動かし装置のロックを外す

(2) 本体を持ち上げる

(3) ヘッド部を引き上げ，床に並行になるように回転させる

(4) ミラーを引いて持ち上げ，適当な方向に回転させる

(5) 電源コードのはこのフタを開け，コードを引きだし，プラグにつなぐ

(6) スイッチを入れる

ガイドオペレーションGO_1は次のステップを踏んでいる

1. ランダムドットレンジファインダとスリット光レンジファインダを使い，3次元データを取得する

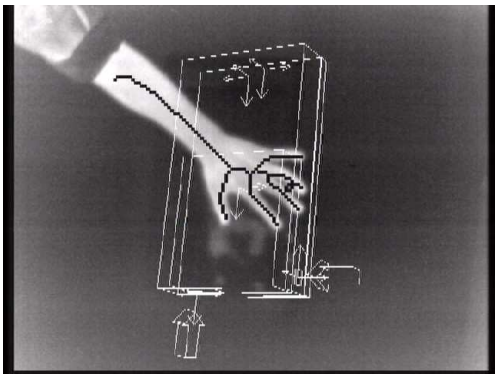

Fig.8: An infrared image for detecting the human hand. The thinning results and the object model are superimposed.

2. 実環境において，OHP の幾何モデルを配置する

3. ロックレバーを配置する

4. 矢印によって位置を示し，ロック解除のためのアノテーション(A_1)を生成する

5. 赤外線画像の中のユーザーの手を探索する

6. 一定時間内に手の位置がロックレバーの近くになければ(C_1)，ユーザーにアンロック動作を促すアノテーション(A_1')を生成する

赤外線画像の処理において，システムは二つのモードを実行している．(1) 指先抽出のための手の領域を推定し，(2) 手の振舞いをモニタリングするために指先をトラッキングする．図8で示すように，手の領域を信頼性良く認識するため，手の細線化処理をする．本体が適度に開いているかどうかをチェックする処理(C_1)において，手とヘッドロックレバーの距離がある一定時間毎に検出する．もしその距離が満たなければアンロックレバーを確認していなかったかもしれず，システムがロックに手を近付ける様に注意するアノテーションを生成する(図9)．

本体のはじめの組み立て作業に関するガイドオペレータ(GO_2)において，次の段階が提供される．

1. アノテーションメッセージ"Unfold the main body"(A_2)を投影する（図10）

2. 本体のエッジの高さをスリットと光レンジファインダにより計測する(C_2)

3. 望ましい状態の幾何学モデルと比較し，本体の高さが十分でなければ第2のアノテーション"Lift up more"(A_2')を投影する（図11）

Fig.9: Adaptive annotation by monitoring the user's action

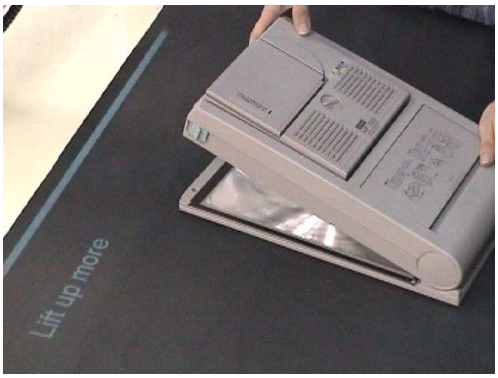

Fig.11: The message, "Lift up more" is projected when the height of the main body is smaller than the model.

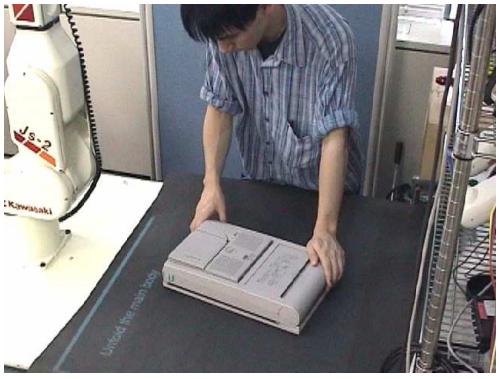

Fig.10: The message, "Unfold the main body" is projected

Fig.12: A striped light is projected to check the height of the main body.

4. 本体の角度が十分である状態 (S_2) が満たされているならば，GO_3 が終了し，GO_4 にシステムは移行する

図 12はスリット光レンジファインダを使い，本体の高さを点検するシーンを示している．システムはスリット光を投影し，光に沿って三次元データを計測する．図 13は持ち上げた高さが適当である時とない時の二つのケースのスリット光を投影した位置の計測データを示している．対象物の幾何学モデルをシステムは持つので，図の中で示すように操作を点検するため，望ましい状態を予測して計測データとを比較して判断する．

ガイドオペレーション GO_3 がスタートし，アノテーションメッセージ"Pull up the head part" を投影する．この操作はヘッドパーツが傾斜角度に沿って引き上げられ，そして，並行に回転させるため，初心者ユーザーには難しい．

1. アノテーションメッセージ"Slide up the head part"(A_3) を投影する．

2. ヘッドパーツの姿勢をスリット光レンジファインダを使って調べる（図 15）．ヘッドパーツの推測データを図 16に示す．図 16は望ましくない状態 (a) と望ましい状態 (b) を比較して示している．

3. もし，正しく組み上がっていなければ，第二のアノテーションメッセージ"Rotate the head part to be horizontal"(A_3') を投影する（図 14）．

6 むすび

ヒューマンロボット・インタフェースシステム PARTNER の人間作業の支援機能である AAF について述べた．ポータブル OHP 装置の組み立て作業を通してその基本機能を確認した． AR ベースのそれ以前の支援システムと比較して，本機能は次の特徴を持つ．

1. PARTNER はプロジェクタを使うため， HMD を装着する必要がなく，複数のユーザーにも容易にアノテーションを行なうことが可能である

2. オブジェクトとオペレータの行動の変化の両方を監視することによって状況に応じた操作案内が可能である

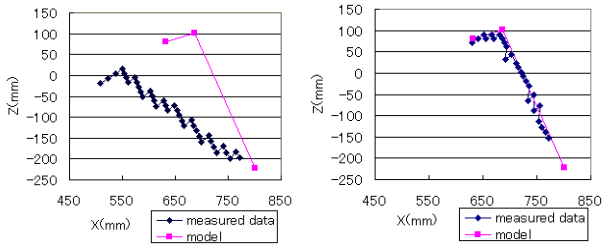

Fig.13: Comparison of the profile of the main body with the model: (a) incorrect operation, (b) correct operation

Fig.14: The message, “Rotate the head part of be horizontal” is projected.

3. PARTNER の構成要素を使って実装されるアクティブレンジファインダを利用できる

4. オペレータの行動の信頼性高い調査と監視のために赤外線画像を使用している

今後の課題として，(1) オペレータの行動の認識処理の改良，(2) 人間とロボットの間の道具の受渡しのようなより柔軟なインタラクションの統合，(3) 音声によるアノテーションの統合を計画している．

参 考 文 献

1) Computer-augmented environments: Back to the real world, *Communication of ACM*,pp.24-97,1993

2) P.Wellner, “Interacting with paper on the DigitalDesk,” Communications of the ACM, Vol.36, No.7, pp.87-96, (1993)

3) R.T.Azuma: “A survey of augmented reality,” *PRESENCE*, Vol.6, No.4, pp.355-385,1997.

4) Y.Ohta, H.Tamura: *Mixed Reality -Merging real and virtual worlds*, Springer, 1999.

5) 寺島, 坂根: 拡張ディジタルデスクを用いるヒューマン・ロボットインタフェース, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8, pp.1091-1098, (1998)

Fig.15: The state that the head part is properly rotated to be horizontal.

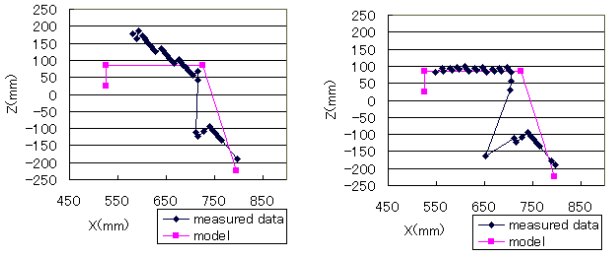

Fig.16: Comparison of the profile of the head part with the model : (a) incorrect operation, (b) correct operation

6) 佐藤, 寺島, 坂根: 実空間強化とヒューマンロボットインタフェース - 指さしポインタの構成 -, 第 16 回日本ロボット学会学術講演会, pp.23-24, (1998)

7) S.Feiner, B.MacIntyre, D. Seligmann,“Knowledge-based augmented reality,” *Communications of the ACM*, Vol.36, No.7, pp.53-62, 1993.

8) T.P.Caudell, D.W.Mizell, “Augmented reality: An application of head-up display technology to manual manufacturing processes,” *Proc. Hawaii Int. Conf. System Science*, pp.659-669, 1992.

9) Y.Ban, S.Wada, K.Sato, and K.Chihara,“A desktop environment for electronic inspection by augmented reality,” *Proc. Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, pp.1277-1280, 1998.

10) 佐藤，井上，溝口: もの作り作業のその場支援, ロボティクス・メカトロニクス講演会’95 講演論文集 (Vol.A), pp.535-538, 1995

11) 森田，沢崎，内山，佐藤: カラートラッキングビジョン, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会, pp.279-280, (1996)

12) 松井: 幾何モデリング機能を備えたマルチスレッド並列オブジェクト指向言語 Euslisp, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.5, pp.650-654, (1996)