

拡張現実感を応用したプラント保守作業支援

京都大学
石井 裕剛

近年注目を集めている拡張現実感(AR)は、現実世界の位置や方向を直感的に示すことができる等の特徴を持つため、プラント保守作業支援に応用することにより、作業効率の向上やヒューマンエラーの低減が実現できると期待されている。本稿では、拡張現実感を実現する際に必要となるトラッキング手法のうち、カメラとマーカを用いたトラッキング手法をプラント保守作業現場で使用可能にするための各種の試みと、実際に拡張現実感を保守作業支援へ応用する試みを紹介する。

●はじめに

拡張現実感(Augmented Reality : AR)技術は、現在位置や方向に応じて人工的に生成した刺激と、現実世界からの刺激を同時に知覚させることにより、実際には存在しないものが、あたかも現実世界に存在しているかのように感じさせる技術である¹⁾。拡張現実感が対象とする感覚は、広くは視覚・聴覚・触覚等、人の全ての感覚が含まれるが、これまでに実現された拡張現実感(AR)は、主に視覚を対象としている。例えば第1図に示すように、人が見ている環境を撮影して得られた映像の上に、その撮影位置と方向に応じて花の3DCG(3D Computer Graphics)を適切に重畳描画した結果を、HMD(Head Mounted Display)等を用いて見ることを可能にすれば、

あたかも目の前にその花が存在しているかのように感じさせることができる。

このような拡張現実感(AR)は、「現実世界の位置や方向を直感的に示すことができる」「通常は目に見えないものを見えるようにできる」等の特徴を備えており、これらの特徴を上手く利用することにより、プラント保守作業の作業効率を向上させたり、ヒューマンエラーを低減させたりすることが可能になる。例えば、作業員の現在位置と方向に応じて次に進むべき方向を提示すれば、作業員を次の作業場所まで安全・確実に誘導できる。また、作業員に危険箇所を直感的に示す機能や、作業手順を直感的に示す機能等も実現できる。

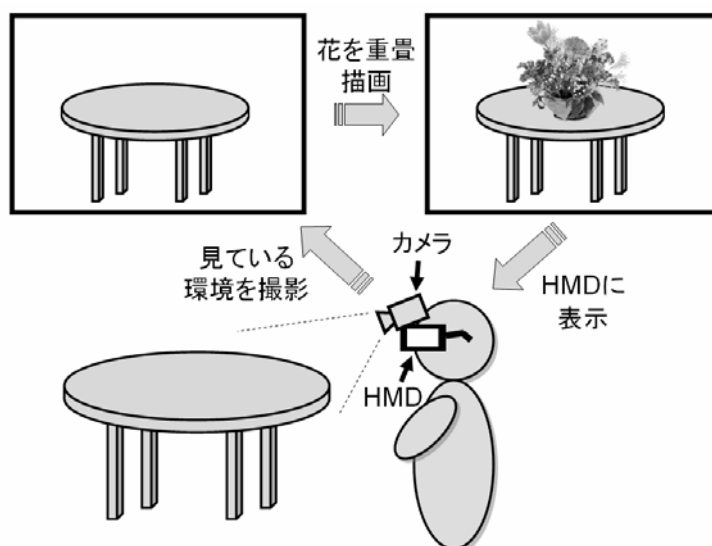
本稿では、拡張現実感を実現するために必要となるトラッキング技術(位置と方向をリアル

タイムで計測する技術)をプラント保守作業現場で使用可能にするための各種の試みと、拡張現実感を保守作業支援へ応用する試みを紹介する。

●既存のトラッキング手法とその問題点

拡張現実感を実現するためには、ユーザの位置と方向を正確かつリアルタイムに計測するトラッキング技術が必要不可欠である。ユーザの位置や方向を計測する方法としては、GPS(Global Positioning System)、慣性センサ、超音波センサ、磁気センサ等を用いたものがあるが、保守作業を行う現場は、広い建屋の内部にあり、金属の機器が多数配置されている等の特徴があるため、GPS、超音波センサ、磁気センサは、現状では使用することが難しい。また、保守作業は比較的長時間行われるため、時間の経過と共に誤差が蓄積する慣性センサは単体で使用することは難しい。以上のような背景から、これまでは、カメラを用いたトラッキング手法をプラント内部で使用可能な様に改良する試みがなされてきた。

カメラを用いたトラッキング手法は、予めその3次元位置が分かっている他と識別可能な特徴的な点群(特徴点群)をカメラで撮影し、画像処理と幾何計算により特徴点群とカメラの間の相対的な位置と方向を求める手法である(他に線や面を特徴として利用する方式



第1図 視覚に対する拡張現実感の例

もある)。カメラを用いたトラッキング手法を、拡張現実感を実現する為に利用する方式には、(1)ユーザにカメラを装着してもらい、環境内に存在する特徴点群を撮影することにより、環境に対するカメラの位置と方向を求めた結果からユーザの位置と方向を求めるインサイドアウト方式と、(2)予め位置と方向が分かっている環境に固定したカメラで、特徴点群を備えたユーザを撮影し、カメラからの相対的な位置と方向としてユーザの位置と方向を求めるアウトサイドイン方式の2つの方式がある。

プラントの保守作業の様に、ユーザが広い範囲を移動する場合には、アウトサイドイン方式を利用するためには多数のカメラが必要になり、コストや事前準備の労力が大きくなる為、通常はインサイドアウト方式を利用する。

カメラの位置と方向の6自由度を一意に求めるためには、最低4点の特徴点が同時にカメラに写り、かつ、それらが互いに識別可能である必要がある。トラッキングに使用する特徴点としては、環境に予め存在する物の角や直線の交差部等の自然特徴点と呼ばれる点を用いる場合もあるが、プラント内部は、保守作業が進行するにつれて機器の配置等が大きく変化するため、自然特徴点のみを用いて安定したトラッキングを実現することは難しい。その為、容易に認識が可能な特徴点をデザインに含んだマークを用いたトラッキング手法を利用することになる。

これまで拡張現実感を実現する際に広く使用されてきた第2図に示すような正方マーク2)は、四角形の4頂点を特徴点としたマークで、四角形内部のパターンによりマーク同士の識別を可能にしている。この様な四角形のマークは、カメラで最低1つのマークを撮影できれば、カメラとマークの間の相対的な位置と方向を一意に求めることができるが、カメラとマークの間の距離が長い場合は、高い解像度のカメラを用い、さらに縦横方向共にサイズを大きくしたマークを用いる必要がある。



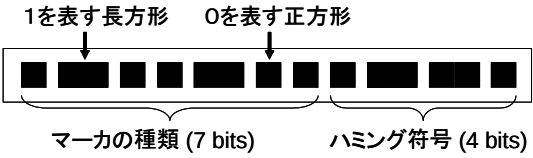
第2図 正方マーク 2)

しかし、プラント内部は複雑な形状をした機器が多数配置されており、大きな正方マークを貼り付ける領域を確保することは難しいという問題がある。

●プラント内部での使用に適したマーク

○ラインマーク

そこでプラントの内部には配管が多数配置されていることに注目し、配管の上に貼り付けやすい形状のマークとして、第3図に示すような線形状のマーク(ラインマーク)を用いたトラッキング手法を開発した3)。このマークは、細長い形状をしていることが特徴のマークで、合計11個並べた正方形と長方形の組み合わせで11ビットの情報を表現しており、7ビットでマークの種類を表現し、残りの4ビットのハミング符号により、任意の1ビットの誤りを訂正できるようにしている。また、マークの両端をトラッキングの計算に使用するための特徴点としている。前述のように、カメラとマークの間の相対的な位置と方向を求める為には、4点以上の特徴点が同時にカメラに写る必要があるため、このマークを用いる場合は、最低2本のマークをカメラで同時に撮影する必要があるが、遠距離から認識可能にするためにマークのサイズを大きくしたとしても、マークの短辺の長さは短く抑えることができるため、プラント内部のような配管が多数存在する環境に容易に貼り付けて使用できる。



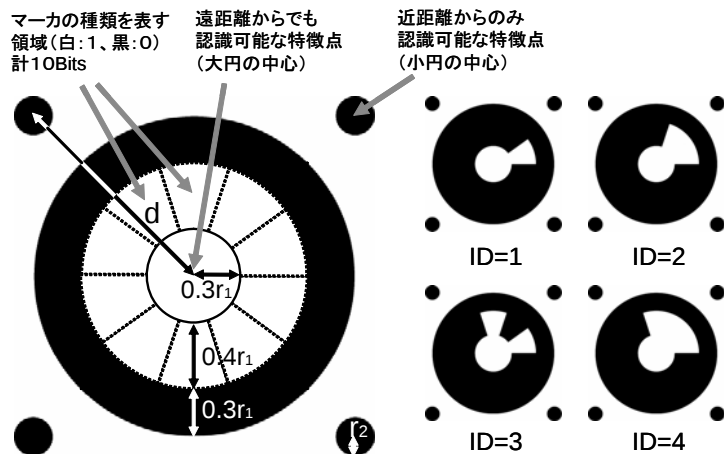
第3図 ラインマーク 3)

例えば、XGA の解像度を持つ白黒カメラ (Point Grey Research 製 DRAG-HIBW) に焦点距離 6.37mm のレンズを装着して使用した場合、余白を含めたサイズが 7cm×52cm のマークを、約 14m の距離まで安定して認識できる。

○遠近両用マーク

前述のラインマークを用いることにより、プラント内でカメラとマークの間の距離が長い場合でもトラッキングができるようになるが、サイズが大きいラインマークのみを使用すると、カメラとマークの間の距離が短くなった場合に、マークの一部がカメラの視野から外れることが多くなり、安定したトラッキングができなくなる。その為、プラントでの保守作業の様に、作業員が広い範囲を移動する状況で拡張現実感を実現する為には、近距離用のサイズが小さいマークと遠距離用のサイズが大きいマークの両方のマークを同時に作業環境に貼り付ける必要がある。しかし、貼り付ける必要があるマークの数が多くなると、その貼付作業や破損時の修繕作業等の労力が大きくなる。

このような問題を解決するマークとして、第4図に示すような遠近両用マークを開発した4)。本マークは、マークの中心に遠距離からでも安定して認識可能な大円が1つ、大円の外側に近距離からのみ認識可能な小円が正方形に4つ配置された構造になっており、大円の中心と4つの小円の中心の計5カ所を特徴点とする。大円の内部は3層構造になっており、一番外側の円環状領域は黒色、一番内側の円状領域は白色とする。大円内の残りの部分をマークの番号を表す領域として



第4図 遠近両用マーカ 4)

10 個の扇形に分割し、個々の扇形毎に白色もしくは黒色とすることによりマーカの番号を表現する(白色を 1、黒色を 0 とする)。カメラとマーカの間の距離が長い場合は、カメラ画像上ではマーカが小さく写るため、1 つのマーカからは、大円が持つ 1 つの特徴点のみ認識可能であるが、作業環境内の広い領域を撮影することになるため、同時に複数のマーカがカメラに写ることになり、複数のマーカからの特徴点を用いてトラッキングを行うことができる。一方、カメラとマーカの間の距離が短い場合は、カメラに同時に写るマーカの数はいくつか減るが、カメラ画像上ではマーカが大きく写るため、大円と小円の両方の特徴点を同時に認識することができる。その為、1 つのマーカのみを用いてトラッキングを行うことができる。このように、遠近両用マーカを用いることで、1 つのサイズのマーカを環境に貼り付けるだけで、遠距離と近距離の両方の距離でトラッキングを行うことができるようになり、広い範囲を保守作業員が移動する必要がある場合でも、環境に貼り付ける必要があるマーカの数を少なくできる。

●マーカ自動計測システム

マーカを用いたトラッキング手法を用いる場合には、環境に貼り付けられたマーカの 3 次元位置と方向を事前に計測する必要がある。しかし、プラント内には、様々な形状の機器が複雑に配置されているため、マーカの貼り

付け位置も複雑になる。そのため、遠近両用マーカを用いることにより、環境に貼り付ける必要があるマーカの数減らすことができたとしても、マーカの 3 次元位置と方向を手作業で計測することは、非常に多くの労力を要するだけでなく、間違いも誘発する可能性がある。

そこで、第 5 図に示すような、マーカの 3 次元位置と方向を全自動で計測するシステムを開発した 5)。このシステムは、ビデオカメラ (Sony 製 EVI-D30)、ビデオキャプチャデバイス (IO・DATA 製 USB-CAP2)、レーザ距離計測器 (Leica Geosystems 製 DISTO Pro 4a)、電動雲台 (Directed Perception 製 PTU-D46-70)、および、それらを制御するパソコンで構成されている。ビデオカメラは、電動雲台を内蔵しており、パソコンからシリアル通信を介して方向、ズーム値、シャッタースピード等を制御可能である。映像はビデオキャプチャデバイスを用いてパソコンに取り込まれる。レーザ距離計測器は、目標に向けてレーザ光を照射し、その反射光と照射光の位

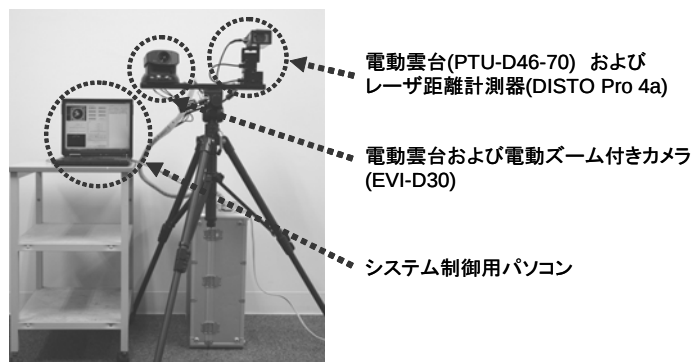
相差をもとに、計測器と目標の間の距離を計測する機器である。レーザ距離計測器も、パソコンからシリアル通信を介して制御可能であり、計測結果をパソコンに取り込み可能である。レーザ距離計測器は、電動雲台に搭載され、パソコンからシリアル通信を介して方向を制御可能である。ビデオカメラとレーザ距離計測器を搭載した電動雲台は、約 0.3m 長の金属角材の両端に固定され、三脚上に固定されている。

マーカ自動計測システムを用いた遠近両用マーカの計測の流れを以下に示す。

- 1) 作業環境の基準となる位置 (世界座標系の原点や座標軸上の点)、および、適当な位置に遠近両用マーカを貼り付ける。
- 2) 遠近両用マーカを見渡せる位置にマーカ自動計測システムを設置する。
- 3) マーカ自動計測システムを用いて全ての遠近両用マーカの 3 次元位置と方向を計測する。
- 4) 計測結果をファイルに保存し、拡張現実感を使用するシステムに転送する。

上記 3) の遠近両用マーカの計測は、以下の流れで自動的に行われる。

- 3-1) カメラを可動範囲全体で等間隔に回転させ、カメラに写ったマーカの番号、大きさ、方向から、どのマーカがどの位置に貼り付けられているかを調べる。ここで得られた位置情報は大きな誤差が含まれる。
- 3-2) 3-1) で認識した全てのマーカの正確な



第5図 マーカ自動計測システム 5)

3 次元位置と方向を、以下の流れにより計測する。

3-2-1) 3-1)で得たマーカの位置情報を元に、カメラの中心にマーカが大きく写るように、カメラの方向とズームを調整する。

3-2-2) 3-1)で得たマーカの位置情報を元に、レーザ距離計測器のレーザ照射方向をマーカの方向に調整する。

3-2-3) レーザを照射前のカメラの映像と、レーザを照射後のカメラの映像を比較することにより、レーザの照射位置を認識する。

3-2-4) レーザの照射位置が、マーカの中心になるように、レーザ距離計測器の方向を調整する。

3-2-5) マーカとレーザ距離計測器の間の距離を計測する。

3-2-6) 3-2-5)で得た計測結果と、レーザ距離計測器の方向から、マーカの中心の3次元位置を求める。

3-2-7) 3-2-2)から 3-2-6)と同様の方法で、マーカの4隅の小円近傍の3次元位置を求める。

3-2-8) 作業環境の基準となる位置に貼り付けたマーカの3次元位置の情報を用いて、世界座標系を基準としたマーカの3次元位置と方向を計算する。

以上の様に、マーカ自動計測システムは、作業環境に設置後、3-1)から 3-3)までの全ての処理を自動的に実行することにより、全自動で遠近両用マーカの3次元位置と方向を計測するため、計測中に作業員がシステムを操作する必要が無く、マーカの3次元位置と方向の計測に要する労力を大幅に低減できる。また、マーカの計測結果は、最終的に世界座標系を基準とした値に変換されるため、マーカ自動登録システムを作業環境の何処に置いて使用しても、計測誤差を除いて、常に同じ結果を得ることができる。

このシステムの計測速度と精度を評価した結果、システムから約 4m 離れた位置に配置したマーカ1個の位置と方向を計測するのに要した時間は約 50 秒であり、位置の計測誤差が 4mm 程度、方向の計測誤差が 1.2° 程度であった。

●拡張現実感を用いた保守作業支援

以下では、これまで筆者らが試みてきた拡張現実感の保守作業支援への応用例を紹介する。

○解体準備作業支援

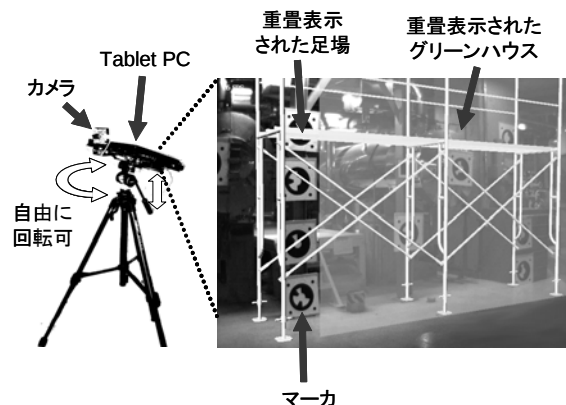
運転が終了したプラントを解体する際には、粉塵が飛散することを防ぐために、解体対象の周りにビニールと支柱からなるグリーンハウスと呼ばれる隔離区域を作成する。また、高い位置にある設備を解体する際には、足場を設置する必要がある。

第6図に示す解体準備作業支援システムでは、拡張現実感を利用することにより、解体作業の現場でグリーンハウスと足場の設置シミュレーションを直感的に実施することを可能にした6)。このシステムは、事前にグリーンハウスと足場に関連づけられた遠近両用マーカとカメラ (Point Grey Research 製 DR2-HIBW-CS) を装着したタブレットPC (IBM 製 ThinkPad X61) で構成されており、解体作業現場に遠近両用マーカを置いてカメラで撮影すると、遠近両用マーカの種類、位置、マーカ間の距離に応じて、作業現場の映像

の上にグリーンハウスや足場が重畳描画された映像が、タブレットPCの画面上に表示される。作業員は、作業環境に置く遠近両用マーカの種類を変えることによりグリーンハウスや足場の種類や高さを変えることができ、遠近両用マーカを置く位置を変えることにより、グリーンハウスや足場の設置位置や幅を変えることができる。マーカの置き場所がそのままグリーンハウスや足場の設置場所となるため、パソコン画面上で同様の作業を行う場合と比べて、直感的にシミュレーションを実施できる。シミュレーションの結果得られるグリーンハウスや足場の設置位置や幅等の情報は、資材を手配する際の参考情報として利用でき、また、グリーンハウスや足場を解体作業現場に重畳表示した映像は、作業員間で作業イメージを共有するためにも利用できる。

○解体作業支援

プラントを実際に解体する際には、通常のビルの解体とは異なり、予め定められた手順に従って作業を進める必要がある。また、解体作業の進捗状況は詳細かつ正確に記録する必要がある。第7図に示すのは、拡張現実感を応用した解体作業支援システムである7)。このシステムでは、(1)切断対象箇所や切断禁止箇所の参照支援と(2)作業進捗状況の記録支援の2つの支援環境を実現した。作業員はビデオカメラを備える小型パソコン (Sony 製 VGN-UX90PS) を作業現場に携帯する。カメラで解体する機器を撮影すると、小型



第6図 解体準備作業支援システム 6)

パソコンの画面上に、カメラの映像が映し出され、さらにその映像の上に、撮影した機器の3次元CADモデルが現実世界の解体対象機器に位置・方向・大きさを合わせて重畳表示される。(1)の参照支援では、重畳表示される3次元CADモデルは、予め設定された切断対象箇所、切断禁止箇所等の情報を元に色分けされて表示される。このモデルを参照することにより、作業員はどの部分を解体すべきか、どの部分は残すべきか等を直感的に知ることができる。一方、(2)の記録支援では、1日の解体作業が終わった時点で解体途中の機器をカメラで撮影すると、その日の作業開始前の状態の機器の3次元CADモデルが重畳表示される。作業員は、既に解体されたために作業現場(現実世界)には存在していない部分と、3次元CADモデル上では残っている部分の境界線を電子ペン(スタイラスペン)を用いて指定することにより切断済の箇所を入力する。このシステムを用いることにより、小型タブレットの画面上で実際の映像と3次元CADモデルの映像の間の違いを見つけるだけで切断箇所が記録できるた

め、より直感的に作業の進捗状況を記録できる。

●まとめ

本稿では、プラント内で使用可能なカメラとマーカを用いたトラッキング手法と拡張現実感をプラントの保守作業支援に応用する試みについて紹介した。拡張現実感を用いた保守作業支援は、実用化に向けて多くの課題が解決されつつあるが、未解決の課題も数多く残されている。特にトラッキング手法に関しては、本稿で紹介したカメラとマーカを用いた手法を利用することにより、広域で安定したトラッキングが実現可能であるが、(1)カメラとマーカの間に障害物が入るとトラッキングができなくなる、(2)作業環境に貼り付ける必要があるマーカの総数が依然多すぎる等の問題がある。今後は、少ない数のマーカでより安定したトラッキングを実現するために、慣性センサや自然特徴点を併用した手法の実現を目指す必要がある。

参考文献

- 1) 特集「拡張現実感(AR)」, 情報処理, Vol.

51, No. 4, 2010.

- 2) H. Kato, M. Billinghurst : Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system, In Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, 1999.
- 3) Z. Bian, H. Ishii, H. Shimoda, H. Yoshikawa, Y. Morishita, Y. Kanehira, M. Izumi : Development of a Tracking Method for Augmented Reality Applied to NPP Maintenance Work and its Experimental Evaluation, IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol. E90-D, No.6, pp.963-974 (2007).
- 4) 石井裕剛, 藤野秀則, 顔 偉達, 楊 首峰, 下田 宏, 泉 正憲 : 遠近両用画像マーカを用いた拡張現実感用広域トラッキング手法の開発, 保全学, Vol.8, No.2, pp.43-50 (2009).
- 5) 石井裕剛, 楊 首峰, 顔 偉達, 下田 宏, 泉 正憲 : 拡張現実感用遠近両用マーカの自動登録システムの開発と評価, 保全学, Vol.8, No.3, pp.60-68 (2009).
- 6) H. Ishii, S. Oshita, W. Yan, H. Shimoda, M. Izumi : Development and evaluation of a dismantling planning support system based on augmented reality technology, In Proceedings of the 3rd International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems for 21st Century, 2010.
- 7) 石井裕剛, 中井俊憲, 卞 志強, 下田 宏, 泉 正憲, 森下喜嗣 : 拡張現実感を利用した原子力発電プラントの解体支援手法の提案と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.2, pp.289-300 (2008).

著者紹介

石井 裕剛

京都大学大学院

エネルギー科学研究科

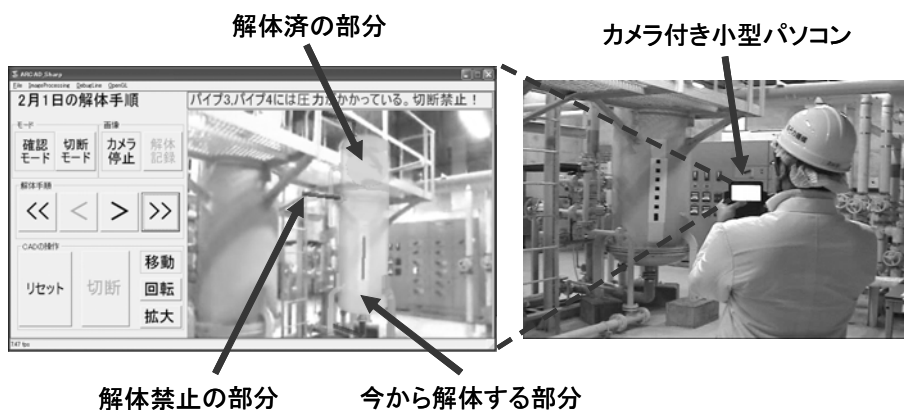
〒606-8501

京都市左京区吉田本町

TEL : 075 - 753 - 5611

FAX : 075 - 753 - 5614

E-mail : hirotake@energy.kyoto-u.ac.jp



第7図 解体作業支援システム 7)

Keyword