

(財)日本建設情報総合センター研究助成事業

プロダクトモデルとオーグメンテッドリアリティを
用いた施工検討システム報告書

平成 18 年 9 月

目次

1 . はじめに	1
2 . 既往の研究	2
2 . 1 IAI の IFC	2
2 . 2 仮組立シミュレーションシステム	3
2 . 3 VR/AR の施工検討への応用	3
3 . 橋梁プロダクトモデル	3
3 . 1 鋼桁橋プロダクトモデル	3
(1) 開発の考え方	3
(2) 開発したクラス	4
3 . 2 PC 橋梁プロダクトモデル	5
4 . VR を用いた鋼桁橋設計架設検討支援	5
4 . 1 VR を用いた設計支援システムの開発	5
(1) 開発の考え方	5
(2) Virtual Reality 技術	7
(3) 開発したプロトタイプシステム	7
4 . 2 立体視の有効性検討	7
(1) 3D-CAD と VR 設計支援システムとの比較	8
(2) ディスプレイシステムの違いによる比較	11
4 . 3 VR を用いた架設検討支援システム	12
(1) 開発の考え方	12
(2) VR を用いた干渉チェックアプリケーションの開発	13
5 . AR を用いた鋼桁橋架設検討支援	13
5 . 1 開発の考え方	13
5 . 2 Augmented Reality 技術	14
5 . 3 ARToolKit	15
5 . 4 AR を用いた干渉チェックアプリケーションの開発	15
6 . AR を用いた RC/PC の配筋支援	16
6 . 1 既設 RC/PC 構造物の内部の鉄筋状況の把握支援	16
6 . 2 AR を用いた配筋およびチェック支援システムの開発	17
(1) AR システムの改良	17
(2) 配筋チェック AR システムの卓上実験	19
(3) 配筋チェック AR システムの現場実験	20
(4) AR を用いた配筋プロセス表示システム	22
7 . おわりに	22
参考文献	24

1. はじめに

我が国における土木構造物のライフサイクルには、計画、設計、積算、施工、維持管理等の様々な作業が存在し、これらの作業は発注者、設計コンサルタント、施工業者等の異なる組織によって行われている。各作業はコンピュータを用いた自動化の取り組みが行われているが、各アプリケーションで作成されるデータは、構造物のライフサイクルにおいて使用される各種アプリケーションとのデータの互換性が保たれていない。従って、アプリケーション間でデータの受け渡しを行う為には手作業を要する。手作業を必要とするということは、非効率的作業であり、人為的ミスの発生、生産性の低下などの問題に繋がると考えられる。そこで近年、これらの背景から製品のライフサイクル全般で必要となるデータを記述するための汎用的なデータモデルである3次元プロダクトモデルの開発が行われている¹⁾²⁾ (図-1)。

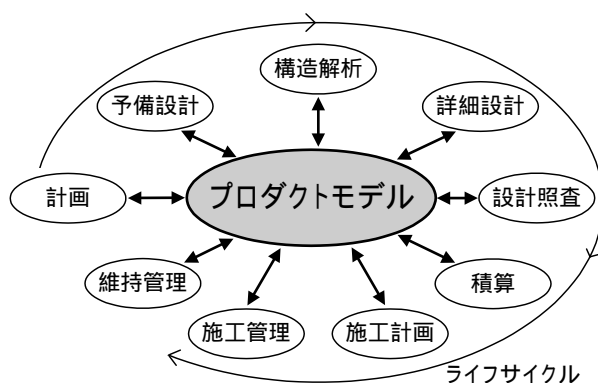


図 - 1 プロダクトモデルによるデータの相互運用

プロダクトモデルの開発に関しては、国際標準としてISO10303のSTEP³⁾(Standard for the Exchange of Product model data)、建築の業界標準としては、IAI(International Alliance for Interoperability)のIFC⁴⁾(Industry Foundation Classes)がある。土木分野では我が国のSXF⁵⁾(Scadec eXchange Format)とJHDM⁶⁾(Japan Highway Data Model)などが知られている。

以前、筆者らは、IFCのバージョン2x(IFC 2x)を拡張することにより、プレストレスト・コンクリート(PC)橋梁を対象としたプロダクトモデルをプレストレスト・コンクリート建設業協会の協力を得て開発した⁷⁾⁸⁾。次に、やはりIFC2xおよびその後のバージョンであるIFC2x2を元に、鋼桁橋を対象としたプロダクトモデルを開発した⁹⁾。同じ頃フランスでは、橋梁一般を対象としたプロダクトデータモデルIFC-BRIDGE¹⁰⁾がSETRA(Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes:道路及び高速道路技術研究所)が中心となり、IAIフランス支部で、IFCに基づいて開発された。これら2つのモデルには、含まれない橋梁形式や部材等が存在する。そこで筆者らは、IFCに基づいて、IFC-BRIDGEと筆者らのモデルとを統合化し、相方の長所を生かし、短所を補う、橋梁全般を対象とした新IFC-BRIDGEを開発した。

一方、プロダクトモデルの利用に関しては、鋼橋の仮組立シミュレーションシステムが幾つかの企業により開発され、実用化されている¹¹⁾¹²⁾。これは、従来行われてきた橋梁の仮組立てを、実際に橋梁を組み立てる代わりに、コンピュータを用いて仮組立シミュレーションを実施するものである。このシステムはプロダクトモデルを用いることにより、シミュレーションに必要な部材の設計デー

タや、製作した部材の計測データ等について、アプリケーション間でのデータの受け渡しを効率化している。しかし、このようなプロダクトモデルは各社のアプリケーションに依存した独自のフォーマットとなっており、また、ライフサイクル全般で使用されていないのが現状である。

将来、3次元プロダクトモデルが標準化され広く使用されるようになると、3次元データを扱うコンピュータのユーザインタフェースが重要な課題となると考えられる。現在は、3次元CADがこの目的に使用されている。しかし、3次元とはいうものの、設計者はコンピュータの平面のディスプレイを見ながらの設計作業であり、現実世界のように立体的に部材の形状や位置関係を把握することは難しい。従って、3次元CADを自由に使いこなせるようになるのは、一般の設計技術者には困難であると考えられる。そこで本研究では、Virtual Reality (VR) 技術に着目し、設計者が立体的に3次元モデルを見ながら設計が行うことができる鋼桁橋の設計支援システムを開発することとした。また、VR技術の一つである立体視に関する評価を行うこととした。

次に本研究では、VR技術は設計のみならず橋梁の架設計画を支援するシステムにも有用であると考えた。橋梁の架設や補修、架け替えを行う際には、架設工法や架設計画の検討が重要である。現在、この架設計画は2次元の図面を用いて行われていることが多い。しかし、2次元のデータでは、架設の際に問題となる周囲の既設構造物や地形、クレーンなどの建設機械との干渉、さらに、架設する部材同士の干渉を予測することは容易ではないと考えられる。また近年、都市部においては道路や鉄道路線の高架化が進んでおり、各路線が立体的に交差している。このように3次的に複雑な現場を対象とした架設工事や架け替え工事などの施工計画の検討を、2次元データを用いて行うことは困難であると考えられる。筆者らはこのような問題を解決するために、3次元のデータを利用し、3次元空間を立体的に把握することのできるユーザインタフェースを備えた架設検討支援システムが必要であると考えた。本研究では架設検討支援システム開発の第一段階として、VR技術を用いた干渉チェックアプリケーションを開発することとした。

さらに、本研究では、Augmented Reality (AR) 技術に着目した。AR技術は、現実世界と仮想世界を重ねることで現実世界の情報を強化、拡張するもので、VRの派生技術と位置づけられる。この技術を応用することにより、実際の現場の映像を用いて架設検討が行えると考えた。本研究では、AR技術を用いた架設検討支援システムの開発の第一段階として、ARを用いた干渉チェックアプリケーションを開発することとした。次に、ARの施工への応用としてPC橋梁のプロダクトモデルとARを用いて、建設工事現場での鉄筋の3次元配筋とチェックを支援するシステムを開発することとした。配筋は、設計者が描く配筋図だけではできず、現場で施工図を描き、さらに熟練した配筋工が微調整したり、配置のプロセスを考慮することにより、実際に完成するものである。今後、こうした熟練した配筋工が不足していく中、非熟練者が配筋できるようにするための支援システムが必要になると考え、そのための初期段階の研究を実施した。

2. 既往の研究

2.1 IAIのIFC

IFCとは、建設業界（元来は主に建築分野）での情報の共有のための方法を提供するために、建設プロジェクトで最小限必要とされるデータ（例えば、梁や柱等）をクラスとして定義し、そのクラスから実態となるオブジェクトの生成、各オブジェクトへのアクセスや演算を行うためのクラスライ

ラリである。すなわち、IFC は建築構造物の要素ならびに設計・施工・維持管理等の情報をまとめた業界ベースのオブジェクトを提供している。よって、施主、建築家、構造技術者、設備業者、施工業者等の各プレーヤーがプロジェクトモデルを共有することが可能となると考えられ、ライフサイクルを通じた各種業務の大幅な効率化が期待されている。

2.2 仮組立シミュレーションシステム

企業における3次元プロダクトモデルの開発例としては、鋼橋の仮組立シミュレーションシステムがある。鋼橋は工場で作成した部材に関して、出来上がり形状の精度等を確認するために仮組立てを行う。しかし、仮組立ては、広大な敷地を必要とし、日数やコストがかかる等の問題がある。このような問題の解決策の1つとして仮組立シミュレーションシステムが幾つかの企業により開発され実用化されている¹¹⁾¹²⁾。

このシミュレーションには部材の設計データや製作した部材の寸法を計測したデータ等が必要となる。これらのデータをアプリケーション間で効率的に受け渡しを行うために3次元プロダクトモデルが開発され使用されている。しかし、これらのプロダクトモデルは、各社のアプリケーションに依存しており、独自のフォーマットである。また、ライフサイクル全般における利用は行われていない。

2.3 VR/ARの施工検討への応用

3次元CADやCGによる施工に関する各種検討事例は、数多く見られる。また、こうした検討をVRによるものとして分類することも多い。しかし、土木分野では、立体視が可能なVRを用いた施工検討の事例はあまり見られない。

ARについては、比較的新しい技術であることから、あまり事例数は多くはないが、盛土・切土などの土工と山岳トンネル工事の施工プロセスを実際の現場でビデオカメラ付きHMDを用いて見せるシステムの開発事例がある¹³⁾。これは、現実のビデオ映像と仮想の施工途中および完成後のCGイメージを重ね合わせたものであることから、Mixed Reality (MR)と呼ばれている。ARとMRは、ほぼ同義と考えられている。

3. 橋梁プロダクトモデル

3.1 鋼桁橋プロダクトモデル

本研究で用いた、以前に筆者らが開発した鋼桁橋プロダクトモデルについて記す。尚、詳細については、文献⁹⁾を参照されたい。

(1) 開発の考え方

鋼桁橋は、設計完了後部材のデータは工場に送られ、工場で個々の部品が製作される。完成した様々な種類の部品を組み立てることにより部材ができる。次に、部材を現場に運搬し、組み立てることにより、1つの鋼桁橋として完成する。このように、設計、製作、架設、及び維持管理といったライフ

サイクル全般に渡り鋼桁橋を構成する個々の部品データが必要である。このことから、鋼桁を構成するフランジやウェブ、補剛材等の最小単位の構成部品から1つのオブジェクトとして定義し、これらを接合してできる部材に関しても、さらに、橋梁そのものも、全て1つのオブジェクトとして定義できるようにプロダクトモデルを開発することとした。

本研究では、鋼桁橋プロダクトモデルを開発するにあたり、ゼロからモデルを構築するのは非効率的であると考え、既存のプロダクトモデルである IFC に着目した。IFC は前述のように建築ビルディングを主対象としたプロダクトモデルで、国際標準を目指して開発されているため、IFC に準拠する形でモデリングすることは、将来の国際標準化の視点からも有利であると考えた。本研究では、IFC の基本構造を壊さず、必要最小限の鋼桁橋用のクラスを新しく定義する形で、鋼桁橋プロダクトモデルの構築を行うこととした。本研究では、IFC のバージョンとして IFC 2x Edition 2 (IFC 2x2) を採用することとした。開発した鋼桁橋プロダクトモデルの一部を図 - 2 に示す。

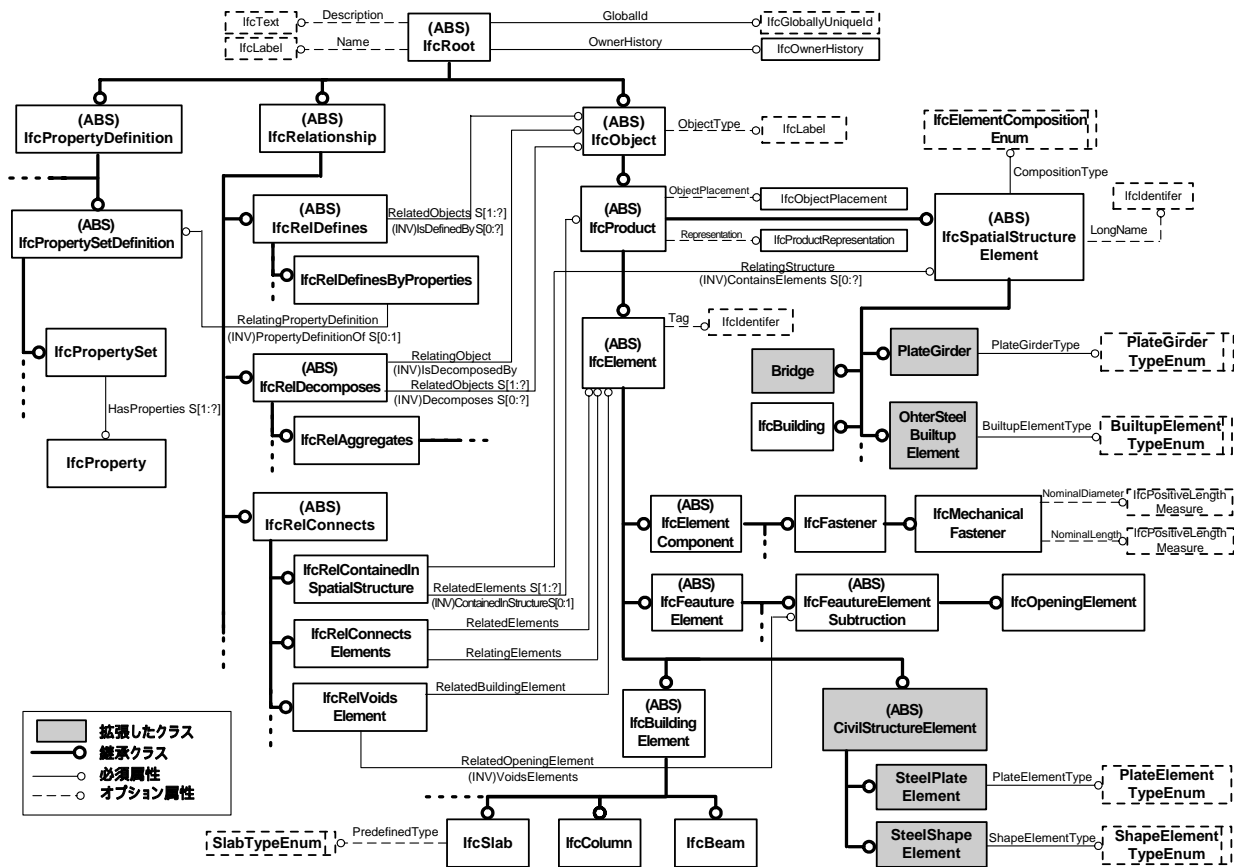


図 - 2 開発した鋼桁橋プロダクトモデルの一部

(2) 開発したクラス

橋梁クラス及び鋼桁クラス

本研究では、まず鋼桁橋を1つのオブジェクトとして定義することとした。IFC を検討すると、建

築構造物を表す IfcBuilding が、柱や梁等の複数の部材から構成される関係に注目した。鋼桁橋もこれと同様と考え、IfcSpatialStructureElement のサブクラスに鋼桁橋用の Bridge クラスを定義した。

次にプレートガーダーを1つのオブジェクトとして定義するために PlateGirder クラスを構築した。このクラスは鋼桁橋を構成する部材であることから、IfcRelContainedInSpatialStructure 等のクラスを用いて Bridge クラスと関連付けるために Bridge クラスと同階層に位置させる。また、プレートガーダーは I 桁や箱桁等の種類があり、これを区別するために PlateGirderType という属性を持たせた。この属性は I 桁であれば I_SHAPE_GIRDER、箱桁であれば BOX_GIRDER 等といったように予め属性値として定義されているものを選択する形式をとる。また、鋼桁橋の構成部材でプレートガーダー以外の部材を定義するために OtherSteelBuiltupElement クラスを同様の手法を用いて構築した。

要素クラス

プレートガーダーは I 桁を例にすると、フランジやウェブ、補剛材等の要素に分けられる。これらの要素も各々オブジェクトとして定義するために、新たに要素クラスを構築することとした。まず、IfcElement のサブクラスに土木構造物用部材の抽象クラスである CivilStructureElement クラスを構築した。次にそのサブクラスとして、フランジやウェブ等の鋼板を定義する SteelPlateElement クラスを構築した。また、定義した部材が何かを識別するために、PlateElementType という属性を持たせた。この属性も PlateGirder クラスと同様に、定義した部材がフランジの場合は FLANGE、ウェブの場合は WEB といった属性値を選択する。また形鋼等の鋼板以外の鋼部材を定義するための SteelShapeElement クラスを SteelPlateElement と同様の手法を用いて構築した。

各要素の形状の表現は、要素端部の断面形状を生成した後、長手方向をベクトルとして、開始端面から終了端面まで面を押し出す手法を用いることとした。

3.2 PC 橋梁プロダクトモデル

本研究では、以前に筆者らが開発した PC 橋梁のプロダクトモデルと IAI フランス支部で開発した IFC-BRIDGE プロダクトモデルを統合化した「新 IFC-BRIDGE」プロダクトモデルの鉄筋部分を用いた。新 IFC-BRIDGE のスキーマの一部を図 - 3 に示す。

4. VR を用いた鋼桁橋設計架設検討支援

4.1 VR を用いた設計支援システムの開発

(1) 開発の考え方

現在構造物の設計に利用されている 3次元 CAD は、3次元構造モデルを2次元のディスプレイに表示するため、部材の位置関係や遠近感などの直感的把握が困難であるという問題点がある。そこで筆者らは、立体視による没入感が得られ、3次元空間の中をユーザが容易に移動出来るような VR 技術を用いた鋼桁橋の設計支援システムの開発を行うこととした(図 - 4)。また、設計支援システムで使用、作成する構造物のデータは、本研究で開発した鋼桁橋プロダクトモデルを元に作成することと

した。

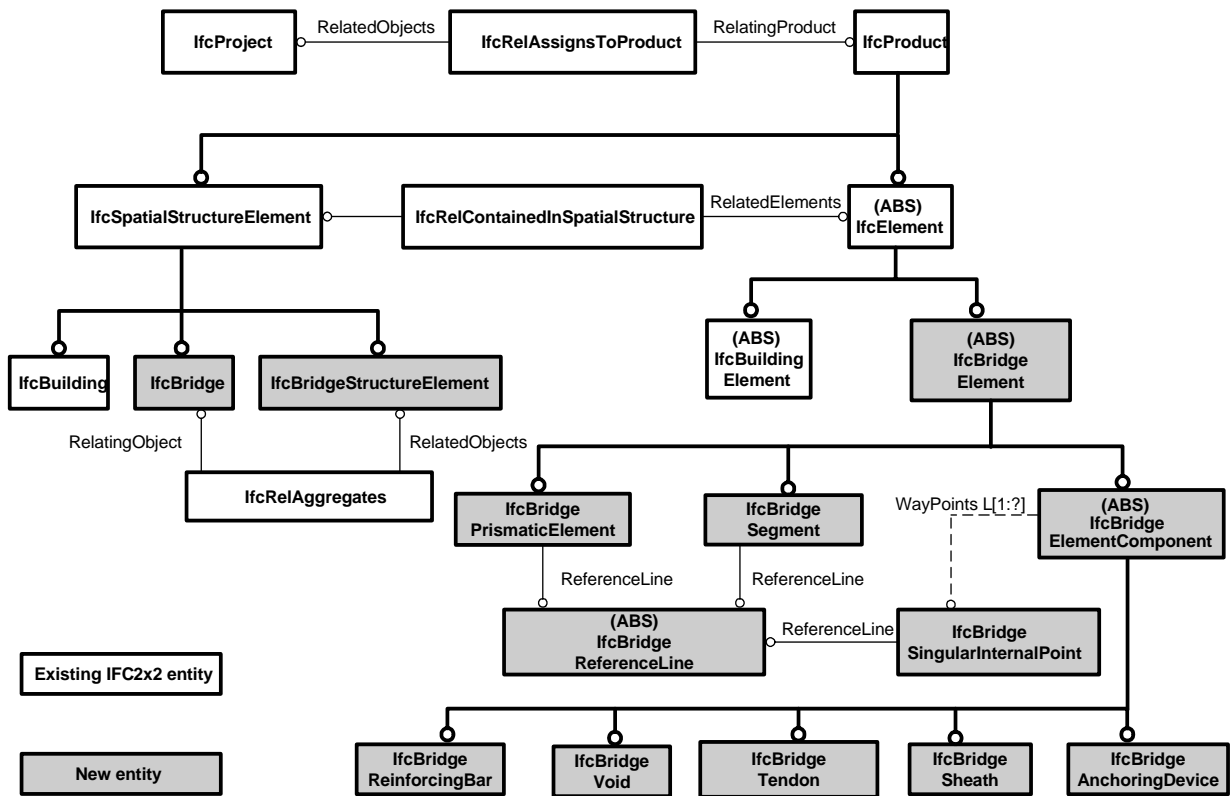


図 - 3 改良された新 IFC-BRIDGE (一部)

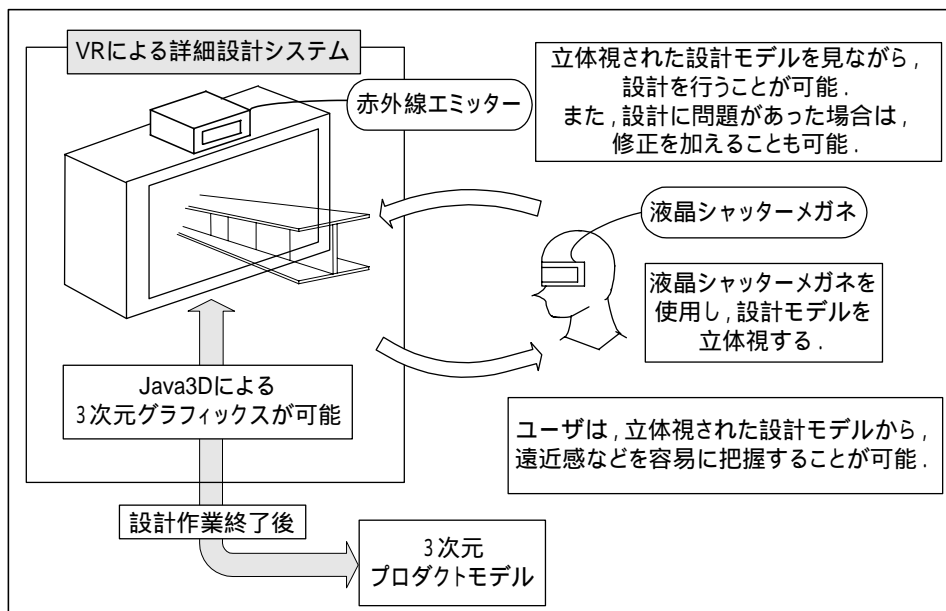


図 - 4 VR を用いた設計支援システムの概略図

(2) Virtual Reality 技術

Virtual Reality (VR) とは「仮想現実」と訳され、コンピュータグラフィックス等を利用して、人工的な現実感や仮想世界を構築する技術をいう。作り出される仮想世界は、現実世界と同様に 3 次元の空間で表現される。また、ディスプレイシステムの利用により立体視を実現し、没入感を得ることができる。さらに、センサーシステムを利用すると、ユーザの位置や動作に対する感覚へのフィードバックを実現することが可能となる。この VR 技術によりユーザは仮想世界で、あたかも現実世界にいるような感覚を得ることが可能となる。

(3) 開発したプロトタイプシステム

本研究では、VR 環境を構築する為に Java 3D¹⁴⁾を用いて設計支援システムを開発した。Java 3D は Sun Microsystems 社が Java 2 用に開発した 3 次元グラフィックスの API(Application Program Interface) である。キーボードやマウスをサポートする標準 Java API を使用することが出来るため、マウスで視点の変更や部材の選択等の操作を行うことが可能である。また、立体的に 3 次元のオブジェクトをみることができる立体視を実現する為に、立体視ディスプレイとして、液晶シャッターメガネ及び赤外線エミッタ (STEREO GRAPHICS 社製 Crystal Eyes 3)¹⁵⁾ (図 - 5) を用いた。

本システムの機能は、プロダクトモデルのデータを読み込み、ディスプレイ上に立体視の画像を描画する。ユーザが通常のマウスで表示されている部材をクリックすると、最前面にある部材が選択され、部材の形状データ等を確認、変更することが可能である (図 - 6)。設計変更した場合には、新しいプロダクトモデルのインスタンスが作成され、表示されている画像に反映される機能を有している。



図 - 5 液晶シャッターメガネ及び赤外線エミッタ

4 . 2 立体視の有効性検討

開発した設計支援システムの大きな特徴は、VR 技術の一つである立体視を実現しているという点である。本研究では、立体視がどの程度効果を発揮しているのかを検討したいと考えた。また、立体視を実現するためのディスプレイシステムは、液晶シャッターメガネ (図 - 5) や Head Mounted Display (HMD) (図 - 7) 等がある。本研究ではディスプレイシステムの違いによる立体視の効果の違いを検討したいと考えた。そこで、本研究ではアンケート調査を実施することとした。本アンケートは本学の土木コース 3 年生を対象に、平成 17 年度に実施したものである。

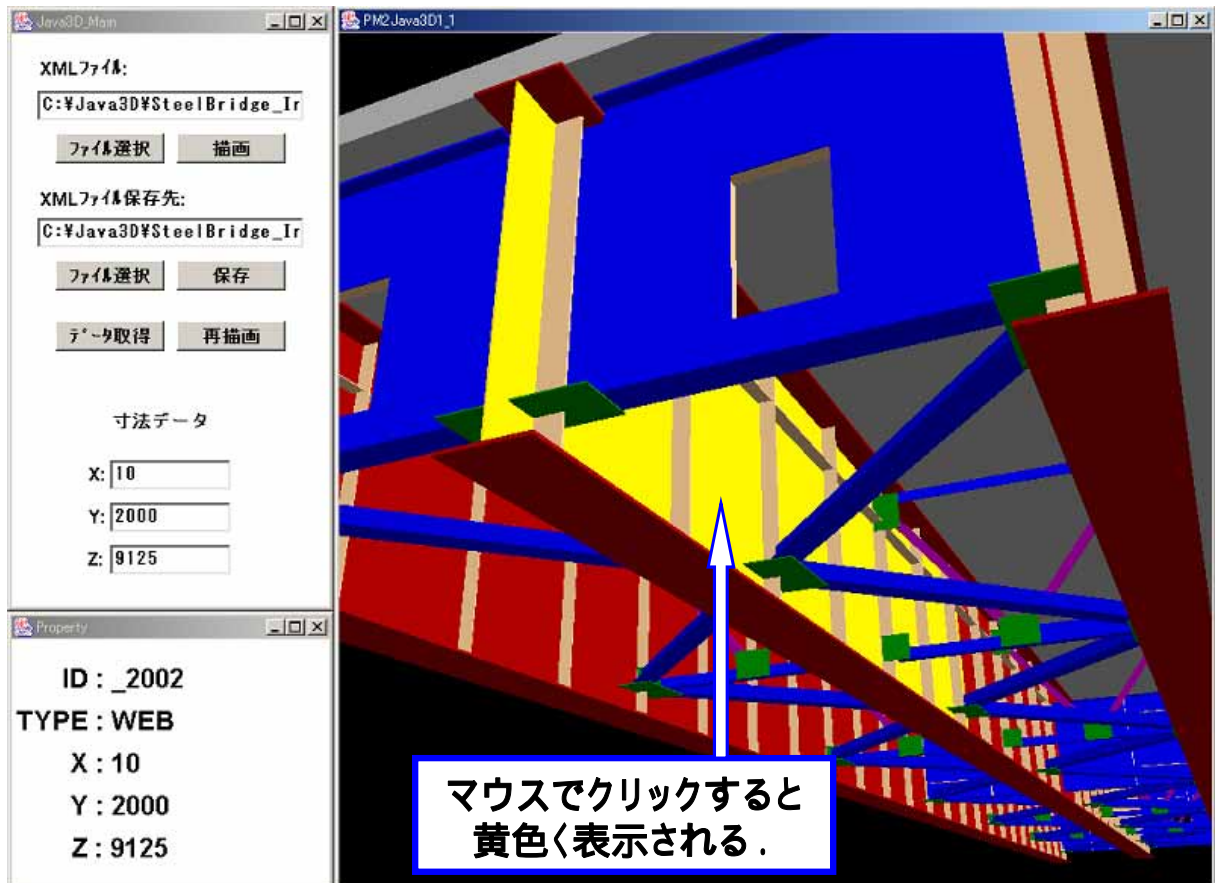


図 - 6 VR を用いた設計支援システムの実行画面



図 - 7 Head Mounted Display (HMD)

(1) 3D-CAD と VR 設計支援システムとの比較

3D-CAD と液晶シャッターメガネを用いた VR 設計支援システムとの比較を行うために、3 種類の問題を作成した。まず、最初の問題としては、サイズの等しいワイヤーフレームの立方体 (図 - 8) を 3D-CAD 及び VR 設計支援システムの画面に描画し、図 - 8 の A (以下 A とする)、B (以下 B と

する)のどちらの立方体に見えるかを選択する形式の問題を作成した。視点は両システムとも B に見えるように設定した。この問題において 3D-CAD の場合を Q-1 とし、VR 設計支援システムの場合を Q-2 とした。

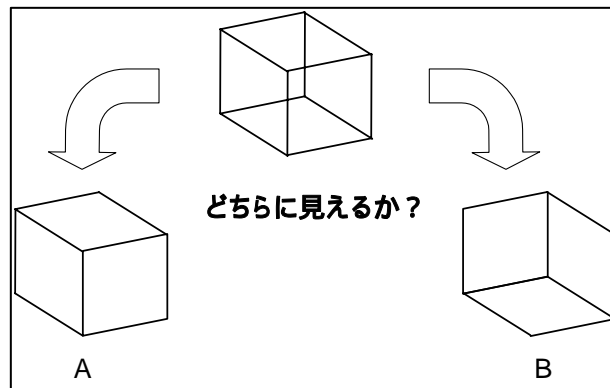


図 - 8 アンケート (Q-1, Q-2) に用いたワイヤーフレームの立方体

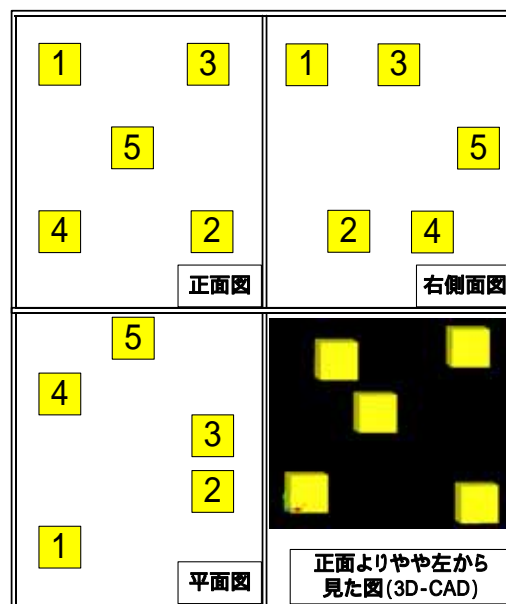


図 - 9 アンケート (Q-3, Q-4) に用いた 5 個の立方体

次に、大きさが等しく位置の違う 5 個の色の付いた (ワイヤーフレームではない) 立方体 (図 - 9) を、両システムの画面に表示させ、手前にあるものから順に順位付けを行う形式の問題を作成した。3D-CAD の場合を Q-3, VR 設計支援システムの場合を Q-4 とした。結果の評価は、1 番から 5 番まで正しく順位付けされている解答を正解とし、一箇所でも間違っている場合は不正解とすることとした。

さらに Q-5 としては、両システムの画面に同じ鋼桁橋のモデル (図 - 10) を表示させ、視点を変える等して、実際に使用して、表 - 1 のようなアンケートに答える形式とした。

但し、今回使用した 3D-CAD は、平行投影図の状態での設計作業を行う形式であり、図法を透視図法に設定するとオブジェクトの追加や修正、削除等の設計に関する操作が不可能になる。このことを考

慮して本アンケートにおいては、実際の設計作業を想定して比較を行うために、3D-CAD の図法として平行投影法を採用した。

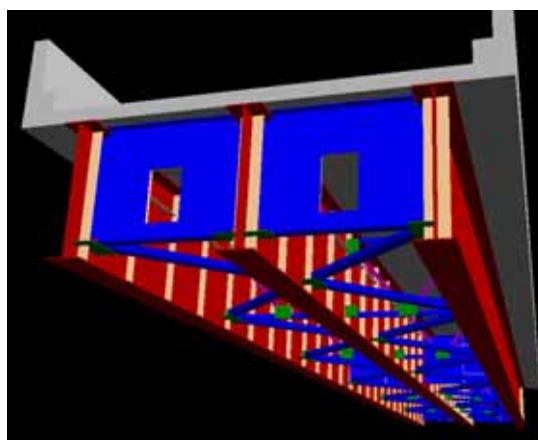


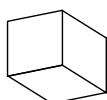
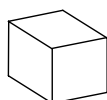
図 - 1 0 鋼桁橋の 3 次元モデル

表 - 1 アンケート表

	非常にそう思う	ややそう思う	どちらでもない	あまりそう思わない	全くそう思わない
①見やすい	5	4	3	2	1
②立体感を感じることが出来る	5	4	3	2	1
③部材の特定が容易である	5	4	3	2	1
④部材の位置関係の把握が容易である	5	4	3	2	1
⑤使用した際、疲れを感じにくい	5	4	3	2	1
⑥実際の構造物をイメージ出来る	5	4	3	2	1
⑦距離感を感じることが出来る	5	4	3	2	1
⑧もっと複雑な構造物になるほど、より見やすくなると思う	5	4	3	2	1

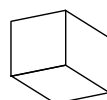
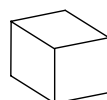
Q-1の結果：3D-CADの場合

Q-2の結果：VR-CADの場合



A:39人

B:2人



A:3人

B:38人

図 - 1 1 アンケートの Q-1 及び Q-2 の結果

このアンケート調査の結果を以下に述べる。Q-1 及び Q-2 の結果を図 - 1 1 に示す。Q-1 (3D-CAD の場合) では、A の立方体に見える」と回答したのが 39 人、B と回答したのが 2 人であった。一方、Q-2 (VR 設計支援システムの場合) では、A と回答したのが 3 人、B と回答したのが 38 人であった。

この結果から，VR を用いた設計支援システムは，全体の約 9 割が視点の設定通りの形状（B）を認識できたことより，立体視は 3 次元形状の把握に効果を発揮していると考えられる．

Q-3 及び Q-4 の正解は図 - 9 のようになる．Q-3（3D-CAD の場合）における正解者の数は 0 人であり，Q-4（VR 設計支援システムの場合）においては全体の約 8 割となる 53 人が正解した．この結果から，立体視は 3 次元空間におけるオブジェクトの位置関係の把握に極めて大きな効果を発揮していると考えられる．

Q-5 の結果を図 - 12 に示す．図 - 12 はアンケート表（表 - 1）の から までの項目に関して「非常にそう思う」を 5 点，「ややそう思う」を 4 点，「どちらでもない」を 3 点，「あまりそう思わない」を 2 点，「全くそう思わない」を 1 点とした場合の平均点をプロットしたものである．

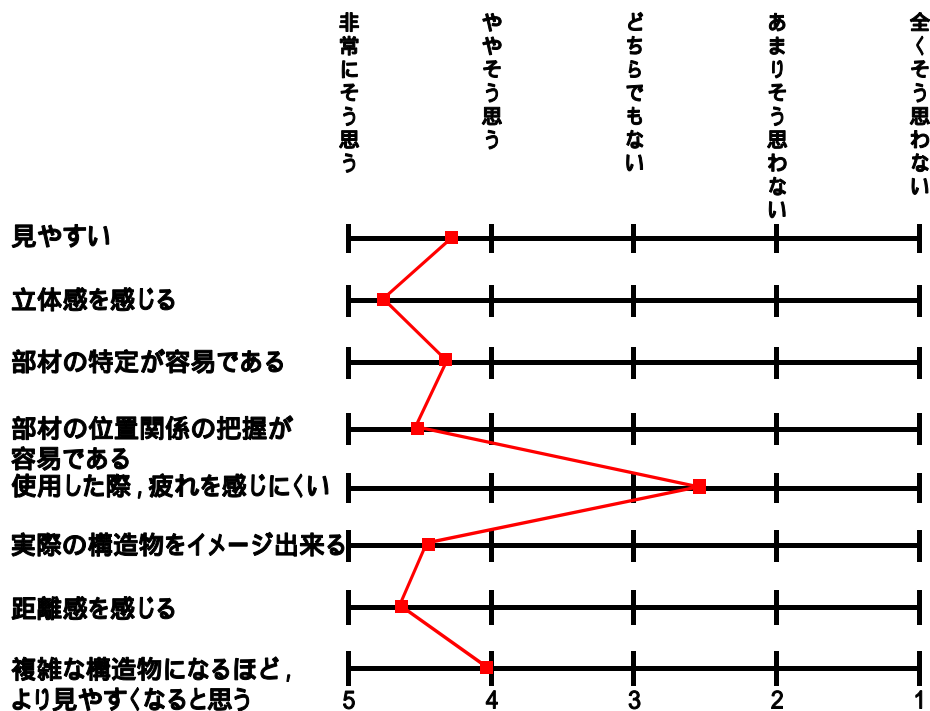


図 - 12 Q-5 の結果（3D-CAD に対する VR を用いた設計支援システムの評価）

この結果より，VR を用いた設計支援システムは立体視が有効的に作用し，3D-CAD と比較して，視覚的に優れていると考えられる結果が得られた．しかし，VR を用いた設計支援システムは 3D-CAD に比べて疲れを感じるという結果が得られた．疲れを感じる原因としては，視覚的な情報と平衡感覚的な情報の不一致等の脳内での情報の混乱による映像酔い，VR 酔いに関係していると考えられる¹⁶⁾．また，立体視の実現方法として，右目用の画像と左目用の画像を高速で交互に切り替え描画しているため，画面のちらつき等も関係していると考えられる．

（2）ディスプレイシステムの違いによる比較

本研究では，立体視を実現するディスプレイシステムの違いによる立体視の効果を検討するために

液晶シャッターメガネ(STEREO GRAPHICS 社製 Crystal EYES3)を用いた VR 設計支援システムと、HMD (i-O Display Systems 社製 i-glasses)¹⁷⁾を用いた VR 設計支援システムとの比較を行うこととした。これら 2つのディスプレイシステムは立体視を実現する方法に違いがある。液晶シャッターメガネは、ディスプレイに右目用と左目用の画像を交互に高速で描画し、これと同期してメガネのシャッターが下ろされ、それぞれの目に別の画像を表示することで立体視を実現する。HMD では、右目用と左目用のスクリーンが分かれており、それぞれのスクリーンに別の画像を表示することで立体視を実現する。

本アンケートの比較方法は、両システムの画面に図 - 10 の鋼桁橋のモデルを表示し、視点を動かす等して、実際に操作した後に、表 - 1 のアンケートに答える形式とした。

この調査の結果を、図 - 13 に示す。全体的に、液晶シャッターメガネ用いた場合が、視覚的に優れているという結果が得られた。一方、「使用した際の疲れ」に関しては、若干 HMD が優れているという結果となった。「疲れ」に関しては、立体視の実現方法の違いが関係していると考えられる。

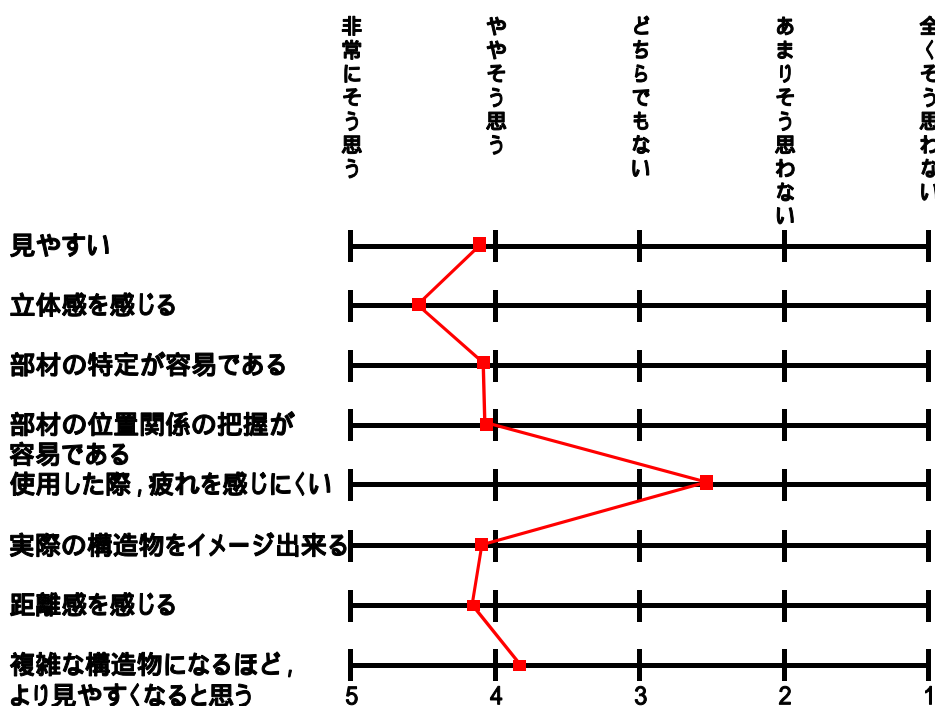


図 - 13 アンケートの結果 (HMD に対する液晶シャッターメガネの評価)

4.3 VR を用いた架設検討支援システム

(1) 開発の考え方

本研究では、鋼桁橋のプロダクトモデルのデータ等を用いて、架設対象の橋梁や周囲の既設構造物、地形、建設機械などを、コンピュータで構築した仮想世界にモデリングし、この仮想世界の中で対象の部材を自由に移動させながら、架設計画の検討ができるようなシステムが必要であると考えた。そこで、VR を用いた架設検討支援システム開発の第一段階として、立体視による没入感が得られる環

境を構築し，仮想世界の中で鋼桁橋の部材を自由に移動させ，干渉チェックを行うことができるアプリケーションを開発することとした．

(2) VR を用いた干渉チェックアプリケーションの開発

本アプリケーションの開発には，仮想世界を構築する 3 次元コンピュータグラフィックスの API として Java 3D を利用することとした．また，立体視を実現するために，ディスプレイシステムとして図 - 5 に示す液晶シャッターメガネを用いた．さらに，仮想世界，すなわち 3 次元空間の操作を行う場合，通常のマウス操作は 2 次元での操作であるため，適さないと判断した．そこで，マウスに変わるデバイスとして，磁気を利用した 3 次元位置計測センサー（POLHEMUS 社製 FASTRAK）¹⁸⁾を用いることとした．FASTRAK は図 - 14 に示すような，トランスミッタとレシーバが磁界を発生させて，3 次元位置座標 (x, y, z) 及びオイラー角 (azimuth, elevation, roll) の計 6 自由度を計測することが可能なセンサーシステムである．

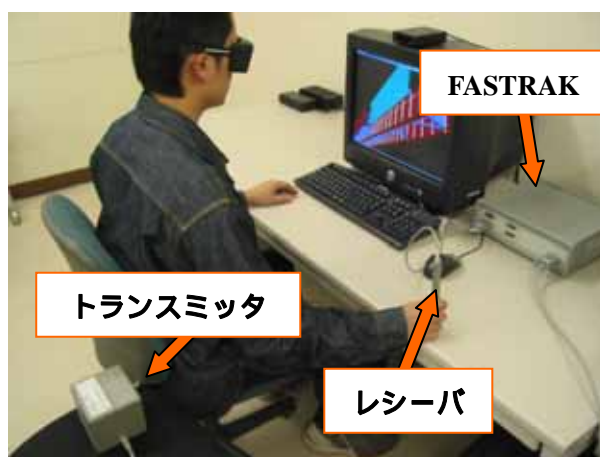


図 - 14 3 次元位置計測センサー (FASTRAK)

本アプリケーションは，FASTRAK で取得した計測データを架設検討の対象である部材の位置座標に適用することにより，3 次元空間での自由な部材の移動を実現している．図 - 15 は，架設対象の I 桁を FASTRAK のレシーバを用いて移動させている時の画面である．もしも他のオブジェクトとの干渉が発生した場合には，図 - 16 のように部材の色が変化してユーザに干渉を知らせる．本アプリケーションは，立体視を実現しており，部材の位置関係の直感的な把握が可能となることから，架設検討の支援に効果を発揮するものと考えられる．

5 . AR を用いた鋼桁橋架設検討支援

5 . 1 開発の考え方

前節では，VR を用いた架設検討支援システムについて述べた．VR を用いたシステムの場合は，コ

コンピュータの3次元の仮想世界に、現場の状況を可能な限り正確に再現する必要がある。これは決して容易な作業ではない。そこで本研究では、ビデオカメラ等で撮影した現場の映像を用いて架設検討を行いたいと考え、Augmented Reality (AR) 技術に着目した。本研究では、AR 技術を用いた架設検討支援システムの開発の第一段階として、干渉チェックアプリケーションを開発することとした。



図 - 1 5 VR を用いた干渉チェックアプリケーションの例 (干渉なし)



図 - 1 6 VR を用いた干渉チェックアプリケーションの例 (干渉あり)

5.2 Augmented Reality 技術

Augmented Reality (AR) とは VR から派生した技術で、「拡張現実感」や「強化現実」などと訳される。AR は現実世界にコンピュータで構築した仮想世界を重ね合わせることにより、現実世界の情報を拡張、強化する技術のことである。Web カメラや HMD 等のディスプレイ装置を用いてユーザに拡張された現実を見せることが可能となる。

5.3 ARToolKit

AR の環境を実現するためには、現実世界と、仮想世界とを重ね合わせる必要がある。そこで本研究では ARToolKit¹⁹⁾を使用することとした。ARToolKit とは、広島市立大学の加藤博一氏とワシントン大学ヒューマンインターフェース技術研究所 (HITLab) によって開発されている画像処理に基づいたオープンソース・ライブラリ群である。Web カメラで図 - 17 のような 2 次元の正方形マーカを映すと、映像からマークの位置や傾きを計測し、マーカ内の固有パターンを検出して、リアルタイムで 3 次元 CG を合成する仕組みとなっている。ARToolKit は AR の研究で幅広く使用されている。

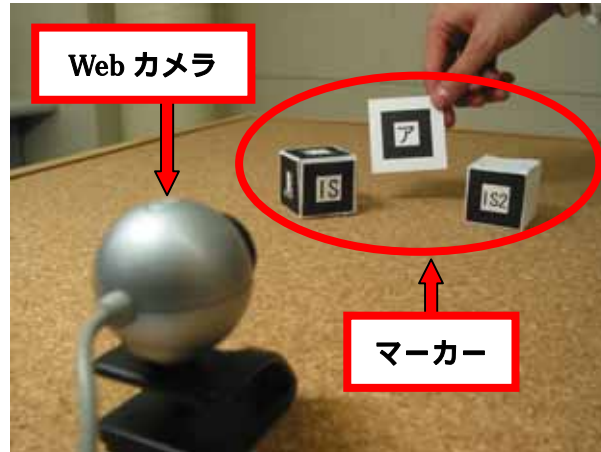


図 - 17 Web カメラとマーカ

5.4 AR を用いた干渉チェックアプリケーションの開発

本研究では、AR 技術を用いた架設・施工検討支援システムの開発の第一段階として、干渉チェックアプリケーションを開発することとした。

本システムは、鋼桁橋のプロダクトモデルのデータと Web カメラ、HMD 等のディスプレイシステムと AR 技術を利用して、実際の現場の映像に仮想世界の映像を重ね合わせた環境を構築し、架設計画の検討を行うことを目的として開発を行っている。本研究では AR を用いた鋼桁橋架設検討支援システムの開発の第一段階として、鋼桁橋プロダクトモデルと Web カメラ、ARToolKit を用いて、簡単な干渉チェックのできるアプリケーションを開発した。

開発には Java 3D 及び Java 3D をサポートしている jARToolKit²⁰⁾、Web カメラ (ELECTRONIC 社製 UCAM-B1C30TSV) を用いた jARToolKit とは、ARToolKit の Java 用プログラム群である。ここでは、筆者らはプログラム開発に Java 言語を使用していたため、jARToolKit を使用した。

図 - 18 は本アプリケーションにおいて Web カメラで撮影した映像がコンピュータのディスプレイに表示されている画面である。図中の右上のマーカに I 桁の 3 次元 CG オブジェクトが合成されているのがわかる。このマークを動かすと、表示されている仮想の I 桁が連動して動き、他のオブジェクトと干渉した際には、図 - 19 のように色が変わる。

本アプリケーションの最大の特徴は、VR とは異なり、現実世界の映像を仮想世界の情報で、強化、拡張している点である。本アプリケーションは、今後、現場における架設計画の検討を可能とするシ

システムとして、効果を発揮すると考えられる。但し、現状では、Web カメラの性能やレンズのひずみなどの影響があり、今後これらの問題を解決することが必要であると考えている。



図 - 1 8 AR を用いた干渉チェックアプリケーションの例（干渉なし）

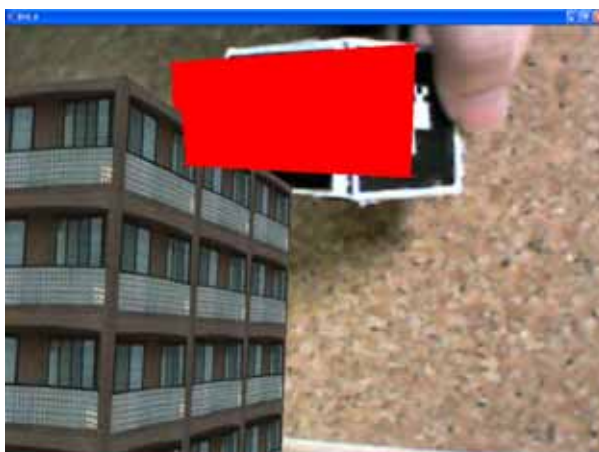


図 - 1 9 AR を用いた干渉チェックアプリケーションの例（干渉あり）

6 . AR を用いた RC/PC の配筋支援

6 . 1 既設 RC/PC 構造物の内部の鉄筋状況の把握支援

落橋防止工施工では、桁と橋脚を固定するためのアンカーボルトを挿入するために、コンクリートに穴を開ける必要がある。しかし、コンクリートの内部では、鉄筋やシース、PC 鋼材などの部材が数多く入っている。これらの部材を避けて穴を開けるのは、非常に困難である。そこで、本研究では、AR 技術を用いて、落橋防止工施工検討支援システムシステムの開発の第一段階として、AR システムの室内実験を行った。

図 - 20 は本システムの室内実験の写真である。図 - 20 (a)の正方形マーカを、室蘭工業大学矢吹研究室の一つの柱に貼った。図 - 20 (b)では、実験者は Web カメラを付けた HMD をかけて、柱を観測している。図 - 20 (c)は HMD のディスプレイで描画された画像である。現実世界の上に重ねて表示されているのは、RC 柱のワイヤフレーム（青線）で、鉄筋（赤線）および落橋防止工である。ユーザは HMD 上に、このような画像を見ることができ、見る位置や角度を変えることができる。

図 - 21 では、本システムの実現方法を示す。jARToolKit を用いて、現実世界の画像から marker を認識し、カメラの位置と姿勢を推定する。Java3D を利用し、仮想世界を描画し、現実世界と仮想世界の画像を合わせて、拡張現実感を実現する。

本システムは、試験的に開発したものであるが、現実には、鉄筋は完全に図面通りには配置されておらず、かなりの施工誤差があり、鉄筋の 3 次元モデルと現実の鉄筋は重ならない。また、実際のコンクリート構造物の内部の鉄筋位置を探索する機械が市販されている。従って、本システムが、この目的で使用される可能性は残念ながら低いと言える。そこで、配筋に着目した。

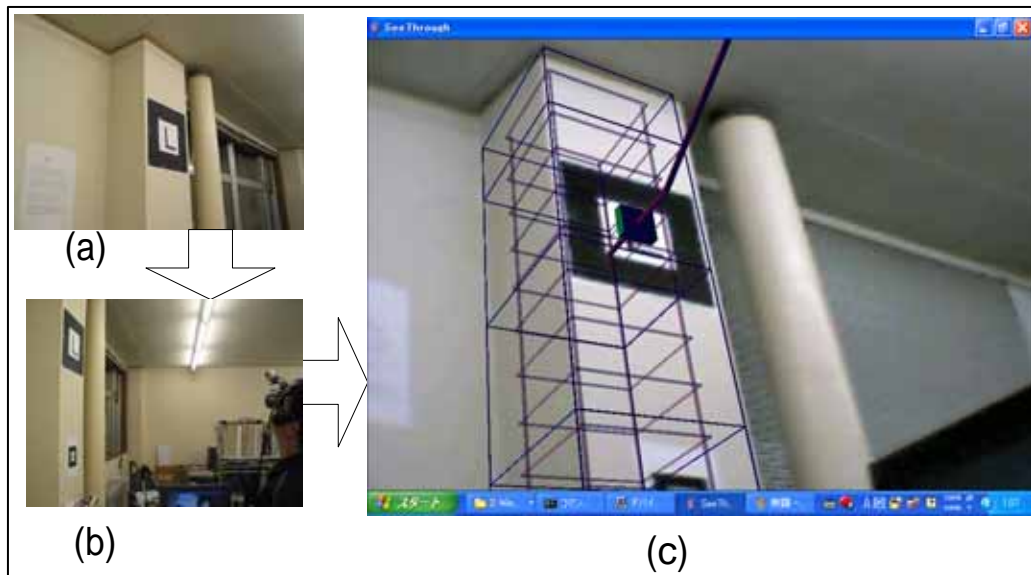


図 - 20 RC 柱の内部の鉄筋を実際のビデオカメラ映像に重ねて表示する

6.2 AR を用いた配筋およびチェック支援システムの開発

(1) AR システムの改良

配筋チェックでは、巻尺等を利用して、鉄筋の太さ、間隔、継手の長さ、かぶり、補強筋の有無などを確認する。この方法は、時間がかかる上、は配筋ミス完全にチェックすることは困難である。そこで、本研究では、配筋チェックにおける労力、時間、コストを軽減するために、AR 技術を用いて、配筋チェック支援システムを開発することとした。本システムでは、図 - 21 に示すように、AR を実現するためのマークを鉄筋の近くに設置する。ビデオカメラを用いて、鉄筋及び周りの映像を撮影して、HMD に表示する。カメラで撮影した映像から、マークを認識し、設計された鉄筋の 3 次元 CG モデルを、合成して HMD に描画する。そこで、鉄筋の映像と仮想的な 3 次元 CG モデルは、同時

に HMD に描画される。ユーザは、HMD に表示される鉄筋の映像と 3 次元 CG モデルのずれを観測して、配筋チェックを行う。

基本的には、6.1 で記述したシステムと同様であるが、jARToolKit と Java3D によるシステムの安定性があまり良くなく、仮想画像が画面内で揺れる現象が見られた。そこで、ARToolKit と OpenGL のコンビネーションに変更したところ、画像が安定するようになった。これに伴い、開発言語も Java から C および C++に変更した。図 - 22 では、本システムの実現方法を示す。ARToolKit を用いて、現実世界の画像から marker を認識し、カメラの位置と姿勢を推定する。OpenGL を利用して仮想世界を描画し、現実世界と仮想世界の画像を合わせて拡張現実感を実現する。

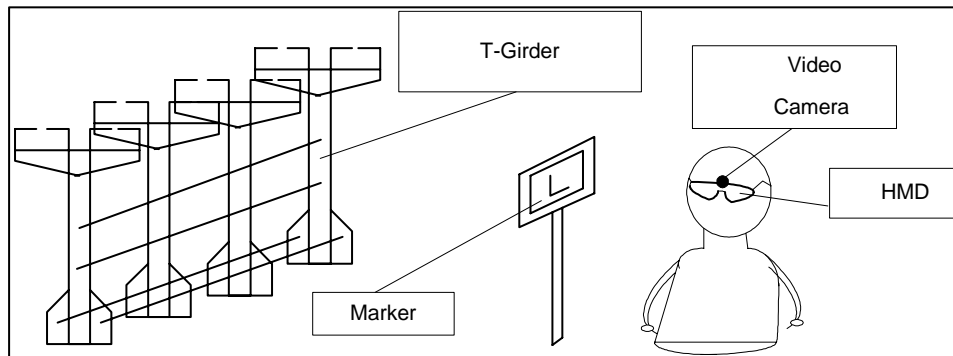


図 - 21 配筋チェックシステム

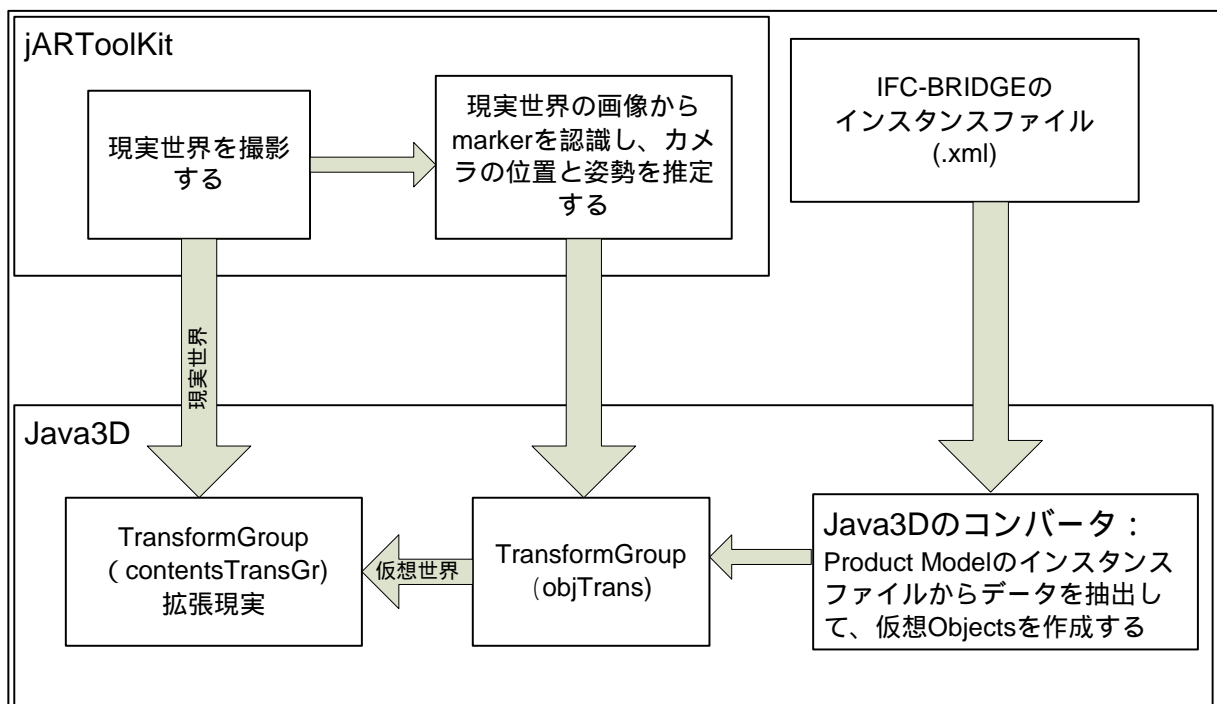


図 - 22 Java と Java3D で AR システムの実現

(2) 配筋チェック AR システムの卓上実験

実際の鉄筋を使用する前に、細い木の棒と接着剤を用いて、配筋チェック AR システムの卓上実験を行った。配筋モデルのインスタンスファイルを新 IFC-BRIDGE プロダクトモデルを元に ifcXML で作成した。次に、図 - 2 3 に示すような 80mm x 80mm x 240mm の直方体模型を太さ 3mm x 3mm の木の棒により製作した。マーカーを机の上に置き、そこから定められた方向と距離だけ離れた場所に木製の模型を設置した(図 - 2 4)。HMD に取り付けられたビデオカメラにより模型及び周りの映像を撮影して、HMD に表示し、カメラで撮影した映像から、マークを認識し、配筋モデルの 3 次元 CG モデルを、合成して HMD に描画した。この 3 次元 CG モデルは、作成したインスタンスファイルから、模型の形状、位置のデータを読み込み作成される(図 - 2 5)。そこで、模型の映像と 3 次元 CG モデルは、同時に HMD に描画される(図 - 2 6)。ユーザは、HMD に表示される配筋モデルの映像と 3 次元 CG モデルのずれを観測して、配筋チェックを行った。カメラのレンズのひずみなどにより、完全に一致させることは出来なかったが、寸法や配置などのチェックは可能であった。本システムにより、小型の模型レベルでは、設計と実際のチェックが可能であることがわかった。

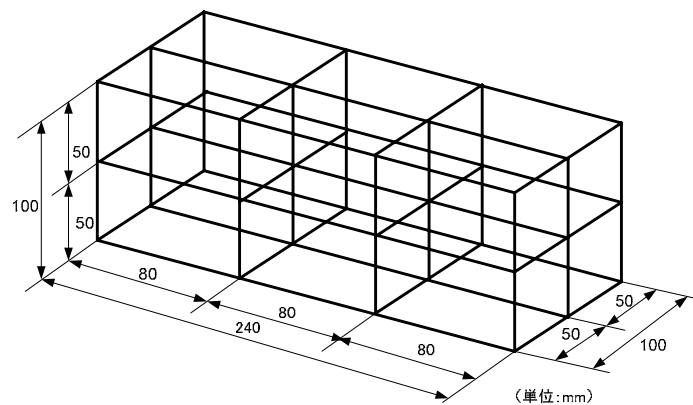


図 - 2 3 卓上実験用木製の直方体スケルトン



図 - 2 4 現実世界の映像

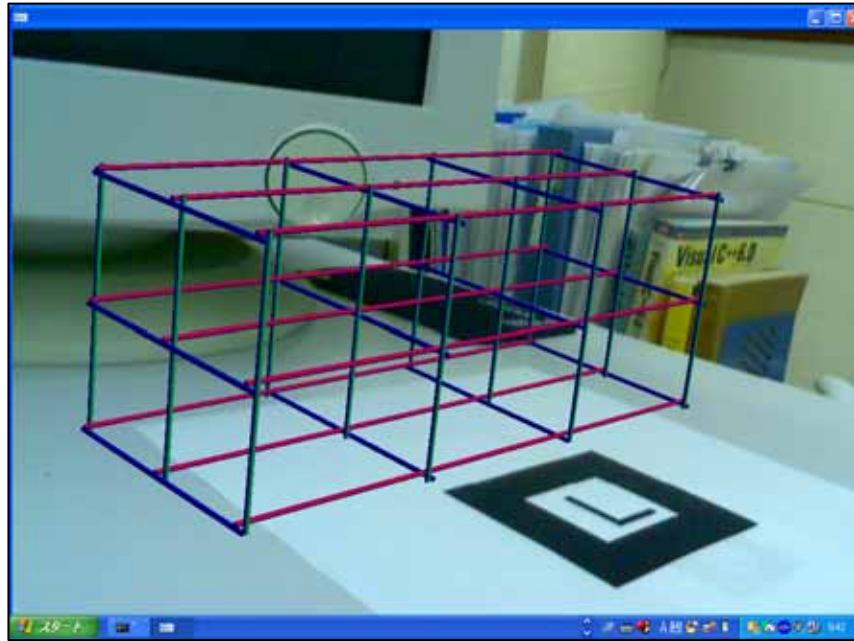


図 - 2 5 仮想オブジェクト

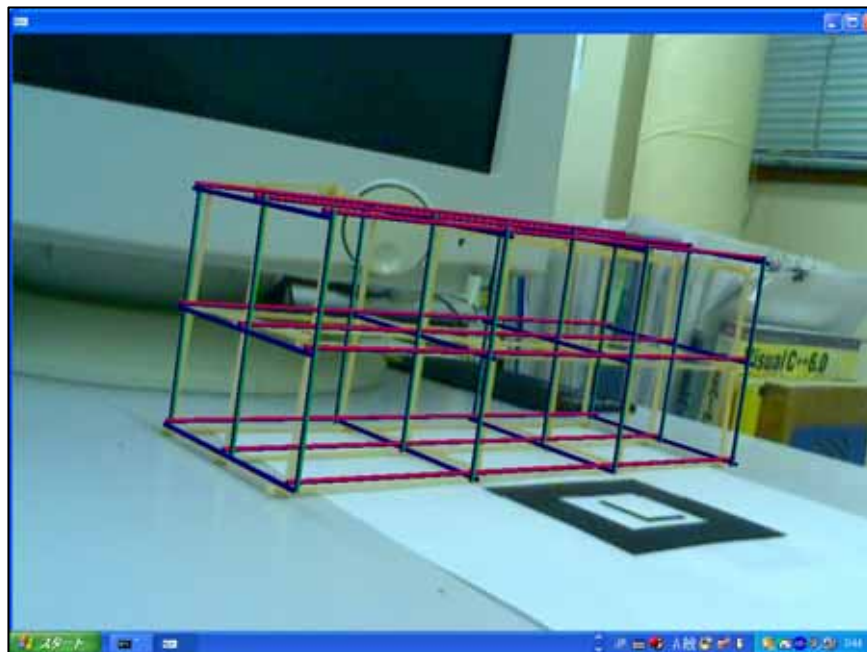


図 - 2 6 配筋チェック AR システムの卓上実験

(3) 配筋チェック AR システムの現場実験

次に、実際の鉄筋での適用可能性を検討する目的で、PC 部材の製作工場において、配筋チェック AR システムの現場実験を行った。対象とした構造物は、2 径間 10 主桁の PC 道路橋の主桁の一部で

ある．図 - 2 7 に示すように，チェック操作員は，HMD に表示される配筋モデルの映像と 3 次元 CG モデルのずれを観測して，配筋チェックを行った．図 - 2 8 に，チェック操作員が HMD で見た画像を示す．この桁の場合，鉄筋がかなり密に配置されているため，3 次元 CG 画像も相当密になった．そのため，実際の鉄筋と仮想的な CG 画像が重なりあって，かなり複雑な画像になった．また，データ量が増えたことから，ビデオカメラを移動した後，かなり時間が経ってからでないとい HMD の画像が変わらないというレスポンスの問題も発生した．しかし，工場の配筋作業工と配筋のチェックを実際に行っている品質管理担当技術者に試験的に使用してもらったところ，上記のような問題を解決すれば，将来的には実務に使えると思うとの感想を得た．



図 - 2 7 配筋チェック AR システムの現場実験

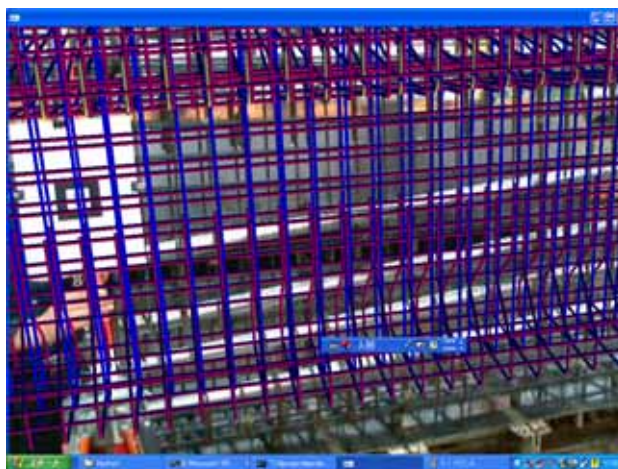


図 - 2 8 実際の鉄筋ビデオ画像に重ねた CG

(4) AR を用いた配筋プロセス表示システム

本 AR システムは、将来配筋熟練工が不足し、非熟練配筋工に配筋プロセスをわかりやすく教えたり、彼らが途中で迷った時にすぐに参照できるようなシステムとして利用することが可能だと考えた。そこで、(3) で用いた PC 橋梁主桁の鉄筋の配筋プロセスを 4 つに分けて作成し、マーカーをビデオカメラ付き HMD で見ると、配筋しようとする場所に、どのパーツをどういう順番で配置していくのかを表示するシステムを構築した。図 - 29 にそれらの図を示す。

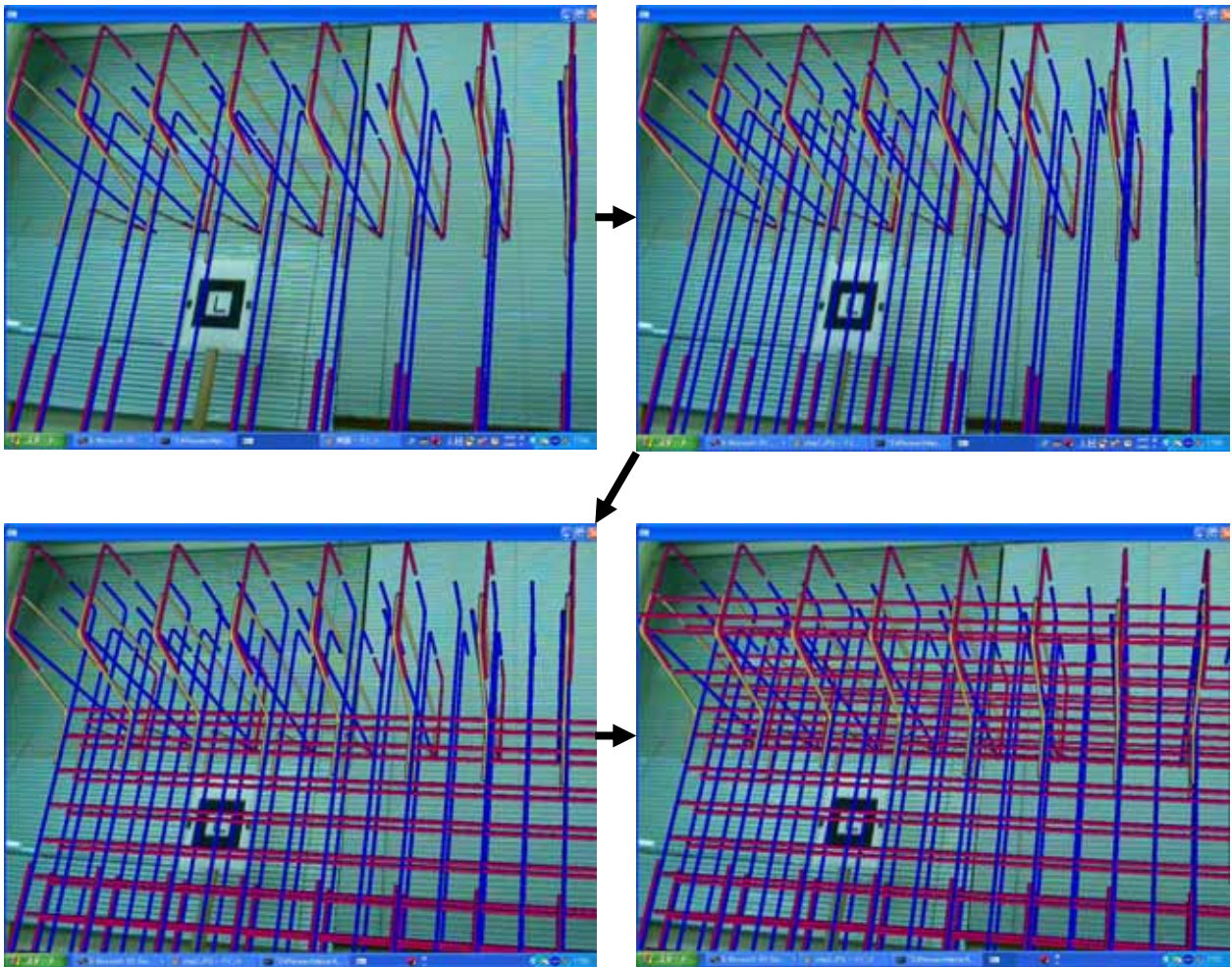


図 - 29 AR を用いた配筋プロセス表示 (四角に L の文字がマーカー)

7. おわりに

本報告書では、既往の研究のレビューの後、まず本研究で用いた鋼桁橋と PC 橋梁を対象とした橋梁プロダクトモデルについて、その概要を記した。次に、3次元プロダクトモデルにより各種アプリケーション間でデータの相互運用が可能になれば、3次元 CAD システムのユーザインタフェースの重要性が益々増していくことを指摘し、これまでに筆者らが開発してきた3次元立体視を可能とする VR-CAD システムとこのシステムによる橋梁の設計方法の概要を述べた。さらに、立体視の有効性の

検証結果を記した。VR は、設計のみならず、橋梁の架設のような施工においてもその力を発揮すると考えられることから、VR を用いた架設時の鋼桁と他の周辺物体との干渉チェックシステムの開発について紹介した。

VR から派生した AR 技術は、現実と仮想世界を重ね合わせた画像をユーザに提供する比較的新しい技術である。VR の代わりに AR を用いて、鋼桁橋の桁の架設時の干渉チェックシステムを開発した。さらに、AR は、配筋の検討やチェックに有効だと考え、既設の RC/PC 構造物内部の鉄筋の状況を設計時の 3 次元プロダクトモデルから現場で現実の映像と鉄筋画像を重ね合わせるシステムを開発した。このシステムは発想は面白いものの、施工誤差があることと鉄筋探査機器が既にあることから、現実に使用されることはあまりないと思われる。

AR は、配筋チェックを行う発注者や施工業者の技術者を支援することと配筋プロセスを作業員に教えることに有効だと考え、配筋チェック支援システムと配筋プロセス表示システムを開発し、卓上および現場実験を実施した。

AR は、まだ、カメラのレンズのひずみなどの影響で、現実のビデオ画像と仮想の CG 画像とを完全に一致させることは困難であり、多少の誤差が発生する。また、仮想データの量が増えると、レスポンスが極端に遅くなるなどの問題もある。今後はこうした問題を解決して、精度が高く、実際の施工に使用されるよう研究開発を行って行きたいと考えている。

本研究を実施している最中である平成 18 年 8 月 14 日（月）の早朝、東京都と千葉県の間を流れる旧江戸川を、東京湾からさかのぼっていたクレーン船（約 380 トン、全長約 36m）が、浚渫工事現場まで約 500m まで近づいたため、乗っていた 3 人の作業員は、船を進めながらクレーンアーム（長さ約 33m）を約 75 度に上げた。直後の 7 時 38 分頃、川面から約 16m の高さにかかっている送電線（275kV）にアームが引っかかり、数回大きな音と火花が発生し、3 本の送電線が損傷した。このため、東京都と千葉、神奈川両県で約 140 万世帯へ送電がストップする大停電となった。約 3 時間後の 10 時 44 分、前面復旧したが、首都圏は、電車やエレベータが止まり、交通信号も消え、店の冷蔵庫や冷凍庫も止まり、大混乱になった。クレーン船に乗っていた 3 人の作業員は「初めて向かう工事現場だった。送電線があるのは知らず、火花が散って初めて事故に気付いた」と話していたという。

クレーン船の作業員達が事前にルートを調査し、クレーンのアームがぶつかるような箇所がないかどうか検討していたら、このようなことは起こらなかっただろう。また、事前に調査しなくても、前方や上方をよく注意していたら、事前に防げたはずである。しかし、「まさかこんなことが！」というような事故や事件が、ちょっとした不注意や他の作業に気を取られていて発生する。建設工事においては、動かす機械類が非常に大きく、密集した都市部で行われることが多いため、「注意しましょう」「よく調べましょう」といった掛け声や標語だけでは、未然に防ぐことは困難だと考えられる。実際、この事件でもクレーンアームの長さは 30m 以上もあり、およそ人間の身の回りの感覚では判断しにくい部分があるといえる。また、2 次元の地図や図面だけでは、3 次元的な物体間の距離や干渉などを素早く、漏れなくチェックすることも困難である。

こうした問題を解決するために、3 次元のプロダクトモデルや VR/AR といった情報技術が有効だと考えられる。本研究の成果が将来、実務に適用され、こうした事故を未然に防ぐことに役立つことがあれば、筆者としては望外の幸せである。

参考文献

- 1) 山本一浩, 小林一郎, 邵兵, 星野裕司: 河川におけるプロジェクトモデルに関する一提案, 土木情報利用技術論文集, Vol.28, pp.83-86, 2003.
- 2) 矢吹信喜, 蒔苗耕司: プロダクトモデルと3次元/4次元CAD, 土木学会誌, Vol.90, No.5, pp.23-25, 2005.
- 3) ISO 10303-1: Industrial Automation Systems and Integration-Product Data Representation and Exchange, Part 1: Overview and Fundamental Principles, 1994.
- 4) IFC: <<http://www.iai-international.org/index.html>>
- 5) SXF: <<http://www.cals.jacic.or.jp/cad/developer/aboutSXF.htm>>
- 6) 本郷廷悦, 石村久治: 橋梁鋼上部工を対象としたJHDM構築に関する研究, 土木情報利用技術論文集, Vol.12, pp.11-20, 2003.
- 7) 矢吹信喜, 志谷倫章: PC 橋梁の3次元プロダクトモデルの開発と応用, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.171-187, 2005.
- 8) 矢吹信喜, 志谷倫章: プロダクトモデルを用いた設計段階における施工性検討手法, 土木情報利用技術論文集, Vol.13, pp.273-280, 2003.
- 9) 矢吹信喜, 小谷隼, 志谷倫章: バーチャルリアリティを利用したプロダクトモデルに基づく鋼桁橋設計システム, 土木情報利用技術論文集, Vol.13, pp.211-220, 2004.
- 10) IFC-BRIDGE: <<http://www.iai-france.org/bridge/>>
- 11) pbfantom: <http://www.civil-eye.com/software/kyouryou/pbfantom/pbfantom.html>
- 12) MASSCOT: <http://www.jip-ts.co.jp/product/bridge/soft/introduction/masscot/index.html>
- 13) 筒井雅行, 近久博志, 小林薫, 阿保寿郎: 複合現実感による地下空間の可視化に関する実験的研究, 地下空間シンポジウム論文報告集, Vol.8, pp.211-220, 2003.
- 14) Java3D: http://java.sun.com/products/java-media/3D/forDevelopers/J3D_1_3_API/j3dguide/index.html
- 15) CrystalEYES3: http://www.stereographics.com/products/crystaleyes/body_crystaleyes.html
- 16) 総務省: コンテンツの生体への影響に関する調査・研究報告書, http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/pdf/040318_1_b1.pdf, pp.18-30, 2004.
- 17) i-glasses: <http://www.i-glassesstore.com/>
- 18) FASTRAK: <http://www.polhemus.com/fastrak.htm>
- 19) ARToolKit: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
- 20) jARToolKit: <http://jerry.c-lab.de/jartoolkit/>

助成研究者紹介

やぶき のぶよし

矢吹 信喜

現職：室蘭工業大学工学部助教授（Ph.D.）

主な著書・論文：

- 土木情報ガイドブック（建通新聞社 平成 17 年）
- サイバーインフラストラクチャ構築による価値創造に向けて（土木学会論文集，No.805/VI-69, 1-13, 2005）
- PC 橋梁の 3 次元プロダクトモデルの開発と応用（土木学会論文集，No.784/VI-66, 171-187, 2005）
- 土木設備の維持管理体系における巡視点検と IC タグの活用（土木学会論文集，No.777/VI-65, 161-173, 2004）