

- 12 拡張現実感技術を用いた配筋施工支援に関する基礎的検討

Fundamental Study on Reinforcing Bar Arrangement Support
Using Augmented Reality矢吹信喜¹・李占涛²

Nobuyoshi Yabuki, Zhantao Li

抄録：本研究では、3次元の橋梁プロダクトモデル新 IFC-BRIDGE と拡張現実感（AR）技術を用いて、配筋設計協調システム、プロセス表示システム及び配筋チェック支援システムを開発するための基礎的検討を行った。これらの AR システムは室内或は現場の環境に仮想シミュレーションされた対象を重畳し、実際の配筋と設計配筋を同時に観察することにより、直観的に操作することを目指した。これら3つのシステムのプロトタイプを開発し、室内実験及び現場実験を行い、システムの可能性と課題を考察した。

Abstract: With a bridge product model named NEW IFC-BRIDGE, a collaborative Augmented Reality (AR) system for the reinforcing bar design, a system showing processes of bar arrangement, and a rebar checking system using AR were developed. Both systems can superimpose virtual simulated objects on either an indoor or an outdoor environment. So engineers are able to carry out design and checking intuitively by observing real and designed rebars at the same time. Prototypes of these three systems were developed. Several indoor and on-site experiments were performed to investigate the applicability and subsequent subjects of these systems.

キーワード：拡張現実感, AR, 配筋, 鉄筋, 配筋検査, プロダクトモデル

Keywords : augmented reality, AR, reinforcing bar arrangement, reinforcing bar, rebar checking, product model

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の施工で、鉄筋の配置を決定すること、或はこの操作を「配筋」という。配筋の正確さは、建物の強度や耐震性に直接影響するため、配筋と配筋検査は重要な作業である。配筋プロセスの計画や、非熟練配筋工に対する訓練、配筋作業、配筋検査、維持管理などを行う際には、2次元の配筋図を用いて行うことがほとんどである。配筋図により、鉄筋の本数や、寸法、形状、位置関係など3次元的に想像するのは、長年の経験が必要である。

しかし、わが国では、少子高齢化に伴い、豊富な経験がある技術者も若年労働者も急激に減少している。技能労働者不足に対応するため、産業基盤の基礎となる熟練技能の継承と技能者の育成が、大きな課題となっている。若年労働者への配筋や配筋検査に関するトレーニングにおいては、2次元の配筋図を用いて鉄筋の位置関係や、結び方、配筋のプロセスを説明することは、かなり困難なことである。配筋作業では、必要な鉄筋が後からでは組み立てられないこともあるので、組立てる前に順序を十分検討しなければならない¹⁾。

2次元の配筋図を用いて鉄筋の組み立ての順序を3次元的に検討したり、ディスカッションするためには、かなりの想像力と経験を要する。

さらに、配筋検査においては、伝統的に、技術者は巻尺を利用して、2次元の配筋図による鉄筋の形状や寸法、間隔、継手の長さ、かぶり、補強筋の有無などを確認するが、この方法は、時間がかかり、全てをチェックすることは困難であり、ミスもしやすい。

そこで、3次元モデルおよび分かりやすく見える（可視化）・感じられる（体感）ユーザーインタフェースの開発が必要であると考えた。

まず、第一に3次元プロダクトモデルの開発である。我々は、橋梁プロダクトモデル新 IFC-BRIDGE 及び関連する支援システムを開発した²⁾。新 IFC-BRIDGE と支援システムを利用することにより、鉄筋の3次元モデルを容易に表現できるようになった。

第二に、3次元データを扱うコンピュータのユーザーインタフェースの開発である。ユーザーインタフェースは「3次元のデータが分かりやすく見える（可視化）・感じられる（体感）」ことが重要である。

プロダクトモデルと3次元 CAD を利用することに

1 : 正会員 Ph.D. 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 准教授
(〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1, Tel :0143-46-5219, E-mail : yabuki@news3.ce.muroran-it.ac.jp)

2 : 学生会員 工修 室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻 博士後期課程

より、土木構造物のライフサイクルの各段階で「データの可視化の問題」はある程度解決されている。しかし、実際の配筋が密に配置されていたり、数量が大きい場合、実際の配筋と設計図に、どの程度のずれがあるかを確認するのは、困難である。配筋の設計データを直接施工現場に重ね合わせ、仮想空間と現実空間を同時に体感できるユーザーインターフェースが必要であると考えた。そこで、我々は、拡張現実感 (Augmented Reality, 略称 AR) 技術に着目した。

本研究では、AR 技術を用いて、複数の技術者が事務室内や建設現場で互いに話し合い、マーカーを操作しながら配筋プロセスについて検討することができる協調 AR システムのプロトタイプを開発した。また、AR 技術を用いた配筋プロセス表示システムを開発し、現場実験を行なった。さらに、AR 技術を用いて、3次元の鉄筋を実際の鉄筋と重ねて、3次元空間を直感的に把握することのできるユーザーインターフェースを備えた配筋検査支援システムのプロトタイプを開発し、現場実験を行った。本論では、AR 技術の配筋への適用に関する基礎的検討について述べる。

2. 既往の研究

近年、建設分野でも AR 技術を用いた研究事例が出てきている。ナリマンら³⁾は AR 技術を用いて、土木工事の設計図を3次元化し、GPS 等の実測データと重ね合わせ、立体空間を管理することにより、施工前や途中で工事の完成予想を可能にする土木施工支援システムを構築した。筒井ら⁴⁾は、トンネルの地下空間可視化の方法を提案した。Kamat ら⁵⁾は、建物の災害調査支援システムを構築した。このシステムでは、災害後変形した建物の画像に仮想基準線を重ね合わせ、建物の変形を直観的に観察することができる。Dunston ら⁶⁾は建築分野の AR に関する研究を概観し、AR 技術に基づくインターフェースを開発した。Webster ら⁷⁾は、建物の内部にある鉄筋などの部材をシースルー (see-through) にする AR システムの開発を報告した。河口ら⁸⁾は、AR を利用し、仮想の建物が現実敷地に観察できる環境デザインシステムを構築した。

筆者が文献調査した限りでは、建設分野で AR に関する研究や応用などが進みつつあるが、配筋作業や検査などに応用したものは見当たらない。また、鉄筋などの構造部材を汎用性のあるプロダクトモデルに基づいて表現した AR に関する研究も見当たらない。そこで、本研究では、橋梁プロダクトモデル新 IFC-BRIDGE と AR を用いた配筋支援に着目した。

3. ARToolKit を用いた AR システムの実現方法

(1) AR 技術と ARToolKit⁹⁾

拡張現実感 (AR) 技術は、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。AR 技術は視覚や聴覚、触覚などの感覚を拡張することができるが、視覚を対象とした拡張現実感に関する研究が一般的である。典型的な視覚 AR システムでは、ユーザーがヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display, 略称 HMD) を利用し、現実世界と仮想世界の画像を同時に観察する。現実空間と仮想空間の位置合わせ (registration) は、拡張現実感技術の最も重要なテーマの一つである。位置合わせの手法には位置姿勢センサに基づく手法と画像情報に基づく手法の二つの種類がある。画像情報に基づく手法では、正方形マーカーを環境に配置する方法が位置合わせの主流になりつつある¹⁰⁾。特に、ARToolKit と呼ばれるライブラリは幅広く利用されている。

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・ライブラリである。図-1に示すように、Web カメラで2次元の正方形マーカーを撮影すると、映像からマークの位置や傾きを計測し、マーカー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。使用するマーカーは自由に作成でき、作成後 ARToolKit の機能を用いて新しいマーカーとして登録することができる。但し、マーカー内の固有パターンはマーカーを回転させても同じになるようなパターンを避けなければならない。

(2) 新 IFC-BRIDGE と ARToolKit を用いた AR システムの実現方法

本研究では、図-2に示すように、ARToolKit を利用し、現実世界の画像からマーカーを認識し、カメラの位置と姿勢を推定する。OpenGL¹¹⁾を用いて、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。仮想世界の画像 (鉄筋など部材の3Dモデル) は、新 IFC-BRIDGE プロダクトモデルのインスタンスファイルから必要なデータを利用して作成する。開発言語としては C++ を用いた。

4. 拡張現実感技術を用いた配筋支援

(1) 拡張現実感技術を用いた配筋設計協調システム

a) システム開発の考え方

配筋のプロセスについての計画や、訓練、討論の時には、複数の技術者による協調作業が重要である。複数の技術者は、配筋作業の順番や方法を検討する際、AR 技術を用いて、タンジブル (触れることのできる)

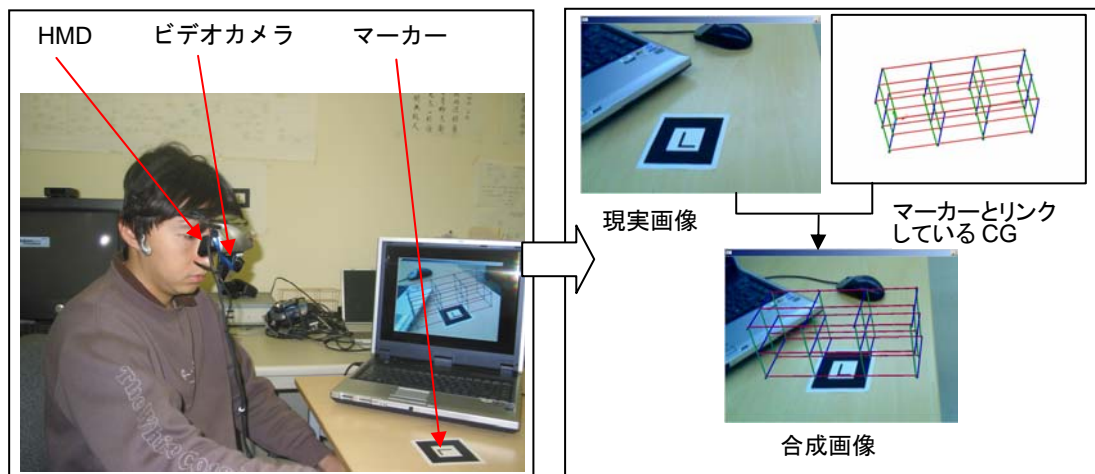


図-1 ARToolKitを用いたARシステム

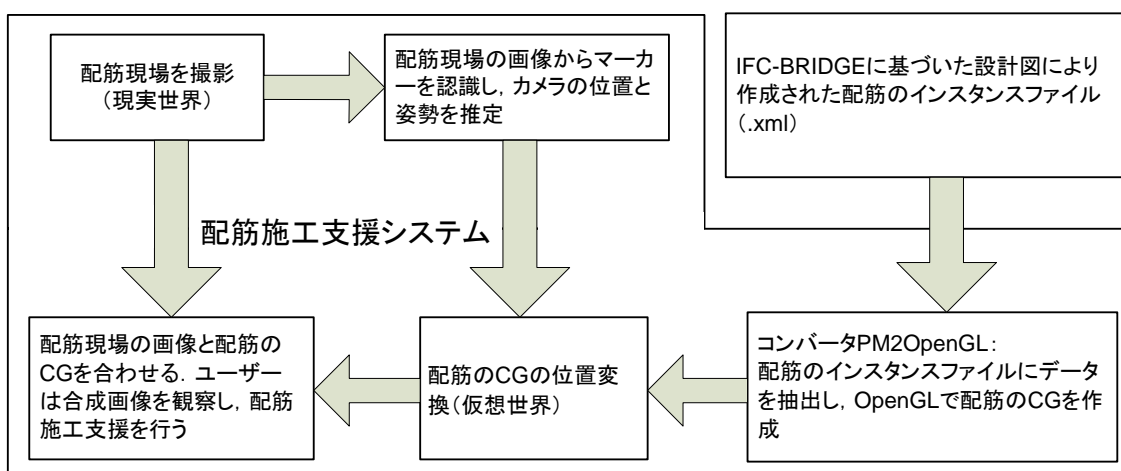


図-2 新 IFC-BRIDGE と拡張現実感技術を用いた配筋支援システムの実現方法

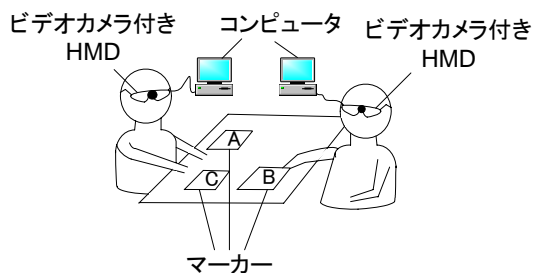


図-3 協調ARシステムの概略図

インターフェースであるマーカールを動かしながら、協調的に作業できるシステムを開発した。本システムの実現方法を図-3に示す。各技術者は、コンピュータにつながったビデオカメラを付けたHMDをかぶる。各技術者のコンピュータには、同じARアプリケーションプログラムがインストールされている。



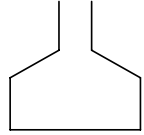
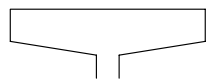

このプログラムでは、ビデオカメラが撮影した映像から、マーカールを認識し、ビデオカメラの姿勢や角度を計算し、新IFC-BRIDGEを用いて作成した鉄筋の

CGをその姿勢や角度によりマーカールの上に重ね合わせる。そこで、各技術者が異なる角度から同じ仮想鉄筋の3次元モデルを観察しながら、対話や協調作業、検討することができる。

b) 配筋設計協調システムの実験の概要

本研究では、配筋設計協調ARシステムを開発し、室内実験を行なった(図-4)。対象とした配筋は、橋梁主桁の断面の一つである。この断面は、5本の鉄筋がある。それぞれの番号はG6、G10、G12、G13、G14である(表-1)。鉄筋のCGを作成するために、新IFC-BRIDGEのインスタンスファイルのデータを利用する。ここでは、5つのマーカールを利用し、それらの鉄筋とリンクした。二人の技術者甲と乙はビデオカメラを付けたHMDを各々かぶって、技術者甲はマーカールCを動かし、技術者乙はマーカールBを動かし、次の順番がG10かG12かという問題に対して検討している。二人の技術者はそれぞれの角度から同じ仮想鉄筋を3次元的に観測し、各自の考え方を直感的に相手に

表-1 鉄筋番号とマーカー

鉄筋番号	G6	G10	G12	G13	G14
マーカー	A	B	C	E	F
配筋の 順番	1	2	3	4	5
鉄筋の 形状					

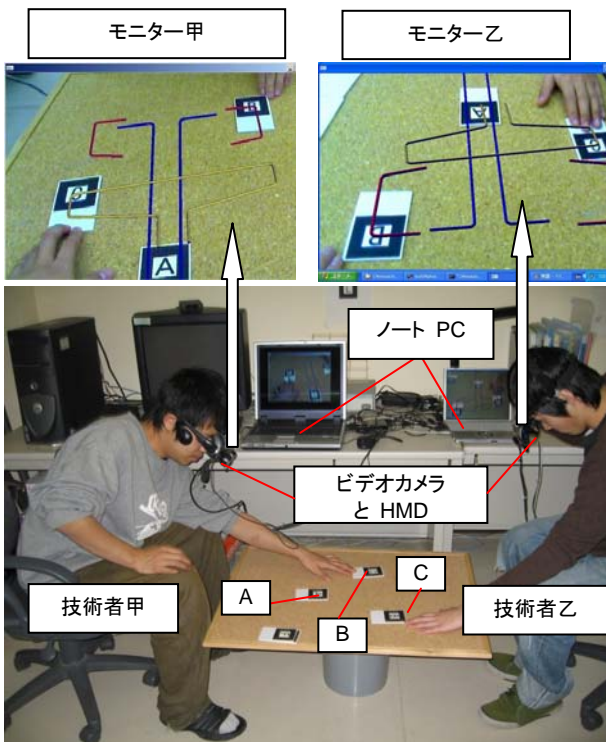


図-4 新 IFC-BRIDGE と拡張現実感技術を用いた配筋設計協調システムの室内実験

伝えることができる。

(2) AR 技術を用いた配筋プロセス表示システム

本研究では、AR 技術を用いて、非熟練配筋工に配筋プロセスをわかりやすく教えたり、作業員が配筋作業で迷った時にすぐに参照できるような配筋プロセス表示システムを開発し、現場実験を行なった。配筋の断面の一つを対象として、配筋プロセスを5つに分けて、新 IFC-BRIDGE を用いて各ステップの鉄筋の CG を作成し、配筋しようとする場所に、マーカーを設置する。ユーザーはビデオカメラ付き HMD で見ると、どのパーツをどういう順番で配置していくのかを観察することができる(図-5)。図-5では、赤、青が仮想空間内の鉄筋である。

(3) AR 技術を用いた配筋検査支援システム

a) システムの基本的な考え方

巻尺と2次元の配筋図を利用する伝統的な配筋検査方法は、時間がかかり、ミスもしやすい。そこで、本研究では、橋梁プロダクトモデル新 IFC-BRIDGE と AR 技術を用いて、3次元空間を直感的に把握することのできるユーザーインターフェースを備えた配筋検査支援システムを開発した。本システムでは、図-6に示すように、AR を実現するためのマーカー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、マーカーを認識し、カメラの位置と姿勢を推定し、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。点検員は、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、配筋検査を行う。

b) AR 技術を用いた配筋検査支援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、配筋検査 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プロダクトモデル新 IFC-BRIDGE を元に ifcXML¹²⁾で作成した。次に、図-7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。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(図-7)、カメラで撮影した映像からマーカーを認識し、ビデオカメラの位置と姿勢を推定した。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。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-8、図-9)。図-8、9では、赤、青が仮想空間内の鉄筋である。ユーザーは、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検査を行

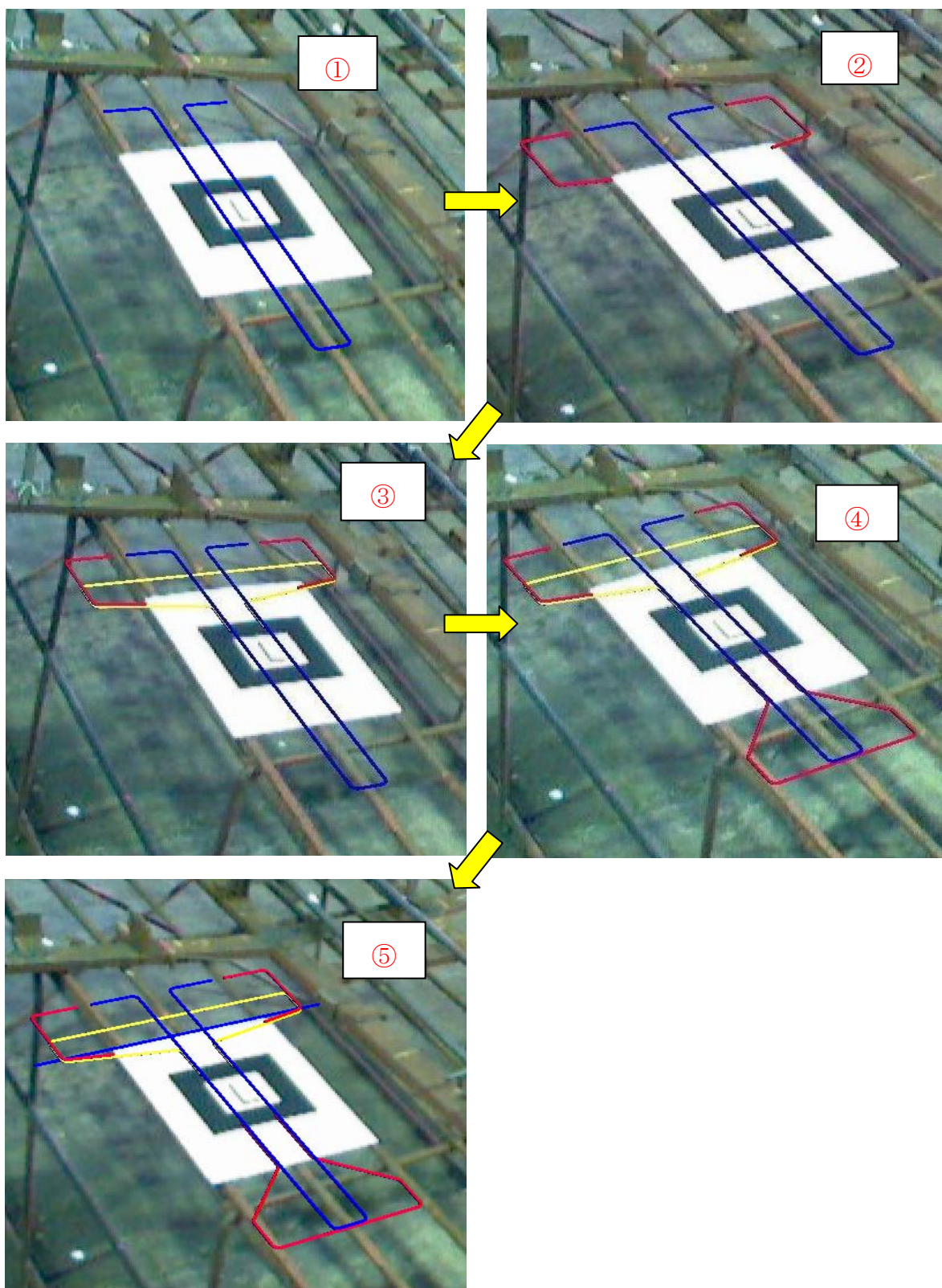


図-5 AR を用いた配筋断面のプロセスの表示

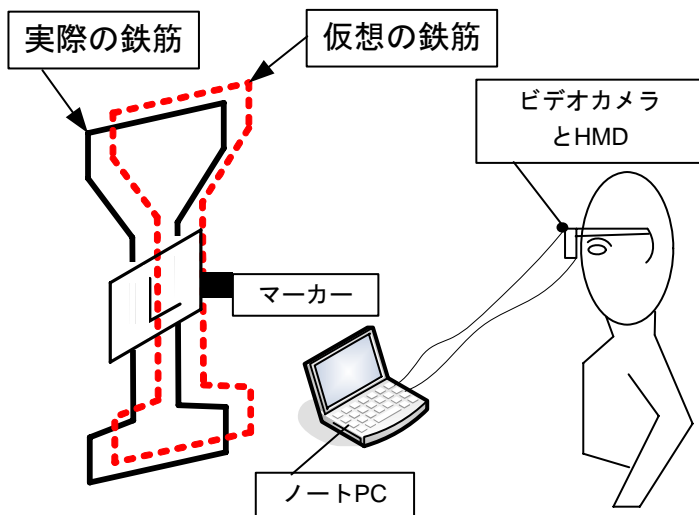


図-6 配筋検査システムの開発コンセプト

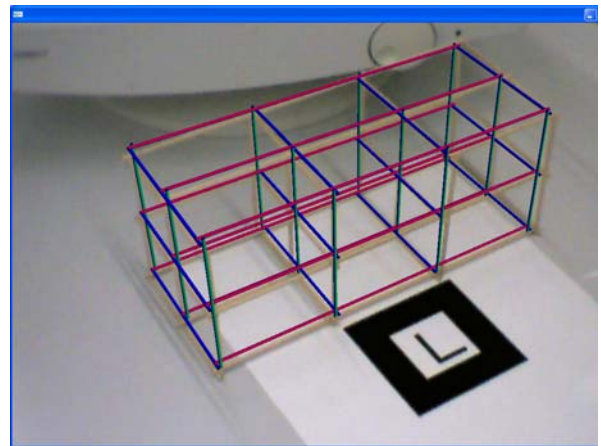


図-8 基準となる配筋（赤、青の2色）と上手な配筋モデル（黄色）の重ね合わせ

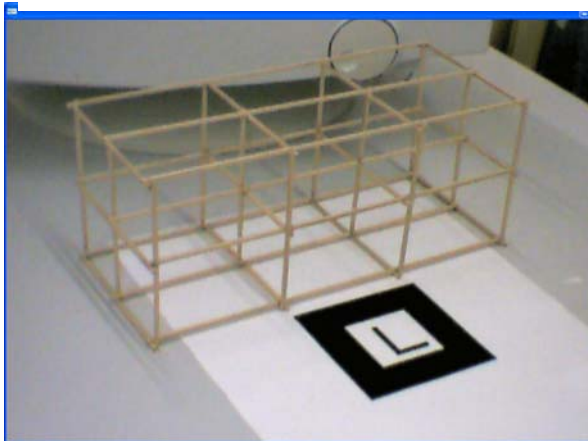


図-7 配筋モデルの映像

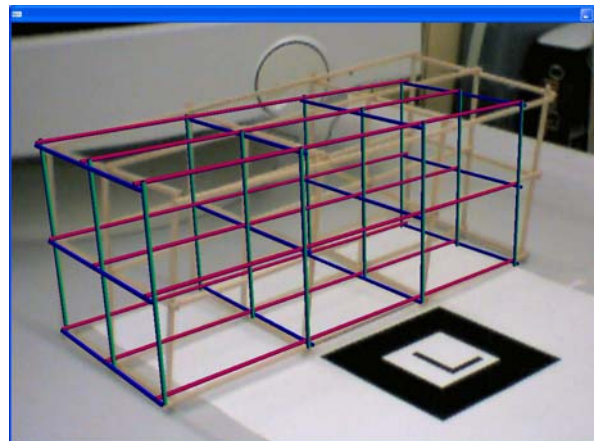


図-9 基準となる配筋（赤、青の2色）と下手な配筋モデル（黄色）の重ね合わせ

った。カメラのレンズのひずみなどにより、画像の誤差があるので、定量的に寸法を測定することができないが、図-8の模型は比較的上手に作成したものであり、図-9の模型は下手なもので、配筋モデルの映像と3次元CGモデルのずれが大きく、不良品であることがよくわかった。本システムにより、小型の模型レベルでは、設計と実際の検査が可能であることがわかった。

c) AR技術を用いた配筋検査支援システムの現場実験

実際の鉄筋での適用可能性を検討する目的で、ドーピー建設工業株式会社幌別工場のPC部材の製作工場において、工場点検員と協力して、配筋検査ARシステムの現場実験を行った(図-10)。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。事前に主桁の2次元の設計図により、プロダクトモデル新IFC-BRIDGEを元に配筋のインスタンスファイル(ifcXMLファイル)を作成した(図-11)。

現実世界と仮想世界の画像の位置合わせは、AR技術の重要な課題である。現場実験では、マーカーを基

準点により正確に配置するのが困難なので、マーカーを実際の鉄筋に貼り付け、HMDにマーカー周囲の仮想配筋と実際の配筋の映像を映しながら、マーカーの位置を調整した。最後に、点検員は、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、配筋検査を行った。図-12に、点検員がHMDで見た画像を示す。赤、青が仮想空間内の鉄筋、黒色が実際の鉄筋である。実際の鉄筋とCGの鉄筋とがほぼ重ね合わさっているため、合格品であることがわかった。

現場実験で四つの問題点があることが判明した。

まず、カメラのレンズにはひずみが存在し、マーカーの位置と向きにわずかなずれがあることから、仮想世界と現実世界の位置を完全に合わせる事が困難なため、まだ実用レベルに達していないことである。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。上記二つの問題は、コンピュータやビデオカメラ、

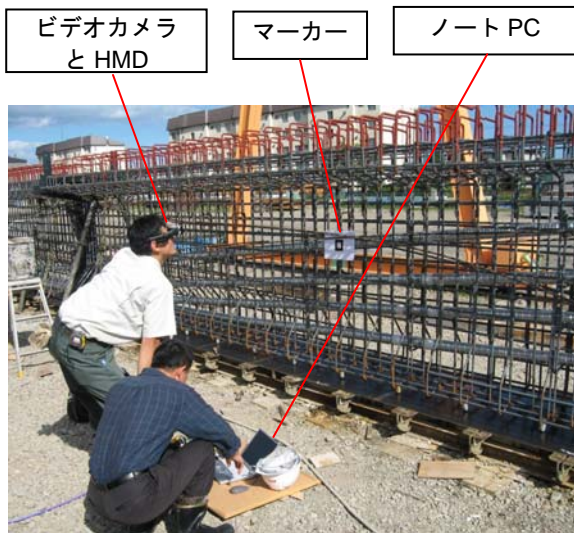


図-10 配筋検査支援システムの現場実験

```

<IfcSweptDiskSolid>
<Directrix>
<IfcCompositeCurve>
<Segments>
<IfcCompositeCurveSegment>
<Transition>CONTINUOUS</Transition>
<SameSense>FALSE</SameSense>
<ParentCurve>
<IfcPolyLine>
<Points>
<IfcCartesianPoint>
<Coordinates excType="list">
<IfcLengthMeasure pos="0">265</IfcLengthMeasure>
<IfcLengthMeasure pos="1">1687</IfcLengthMeasure>
<IfcLengthMeasure pos="2">0</IfcLengthMeasure>
</Coordinates>
</IfcCartesianPoint>
<IfcCartesianPoint>
</Points>
</IfcPolyLine>
</ParentCurve>
</IfcCompositeCurveSegment>

```

図-11 配筋のインスタンスファイル（一部）

HMD などハードウェアとソフトウェアの進歩と共に解決が可能であると考えられる。

次に、ビデオカメラが撮影し、HMD で表示する現場の画像は、品質がいくら高くても、現場の様子と違う。ユーザーにとって、真実感の問題が存在する。光学透過型シースルーAR システム¹³⁾を採用すれば、ユーザーは現場を観察する同時に、仮想鉄筋も見える。真実感の問題を解決できると考えられた。

最後に、この現場実験で使用した正方形マーカーの場合、点検員はマーカーを中心とする直径が120cmの円の範囲のみ見ることができ、視野がかなり狭かった。実際の構造物に応用するためには、複数のマーカーを鉄筋のいくつかの場所に設置することにより、幅広い範囲の鉄筋を観察することができるようにした方が良く考えた。

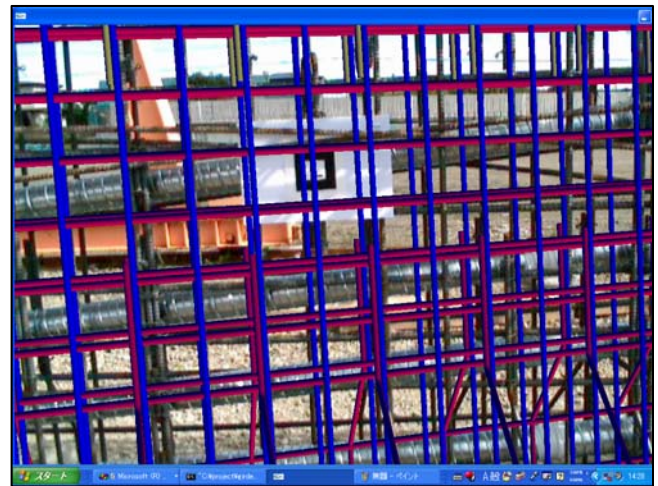


図-12 実際の配筋に重なるCG

5. まとめ

本研究では、拡張現実感技術を利用し、高臨場感を持つ配筋支援システムの開発に関する基本的検討を行った。また、配筋支援システムの現場実験を行って、本システムの課題を考察した。

本研究の成果を以下にまとめる。

- 拡張現実感技術を用いた配筋設計協調システムのプロトタイプを開発し、室内実験を行なった。複数の技術者はそれぞれの角度から同じ仮想鉄筋を3次的に観測し、各自の考え方を直感的に相手に伝えることができ、配筋設計の協調的作業を実現することができることを確認した。
- 拡張現実感技術を用いた配筋プロセス表示システムを開発し、現場実験を行なった。非熟練配筋工に配筋プロセスをわかりやすく教えたり、配筋作業に作業員が途中で迷った時にすぐに参照できるようになると考えられる。
- 拡張現実感技術を用いた配筋検査支援システムのプロトタイプを開発し、室内実験を行った。本システムにより、小型の模型レベルでは、設計と実際の検査が可能であることがわかった。また、配筋検査の現場実験も行った。カメラのレンズのひずみなどにより、画像の誤差が存在するので、システムの精度がまだ上達できなかった。さらに、定量的に検査することがまだできなかった。しかし、鉄筋の本数や、位置関係、形状の検査が可能であることがわかった。

今後の課題としては、プロダクトモデルと拡張現実感技術を用いた施工システムの更なる高度化を図っていくと共に、実用化へ向けた努力を重ねていくことが考えられる。

謝辞： 本研究を遂行するにあたり、独立行政法人日

本学術振興会の二国間交流事業・日仏交流促進事業＜SAKURA＞共同研究の支援及び財団法人日本建設情報総合センターの研究助成を受けました。また、ドーピー建設工業株式会社幌別工場の方々に実験でお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 津野和男, 大内雅博, 秋元泰輔, 小島圭一: 土木建設技術全書 36, 鉄筋コンクリート施工法 (土木施工法講座) 23, 山海堂, pp.107, 1978 年 9 月.
- 2) 矢吹信喜, 李占涛: 日仏橋梁プロダクトモデルの統合化による新 IFC-BRIDGE の開発と CAD コンバータの改良, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.59-66, 2006 年 10 月.
- 3) ダハラン・ナリマン, 西野浩明, 宇津宮孝一, 山口和之, 小原文男: 拡張現実感による土木工事支援システムの開発, 日本バーチャルリアリティ学会第 6 回大会論文集, pp.9-12, 2001 年.
- 4) 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 年.
- 5) Vineet R. Kamat and Sherif El-Tawil: Structure of an Augmented Situational Visualization Framework for Rapid Building Damage Evaluation, *Proc. Of Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, ADETTI/ISCTE, Lisbon, Portugal, September 13-15, 2004.
- 6) Phillip S. Dunston and Xiangyu Wang: Mixed reality-based visualization interfaces for architecture, engineering, and construction industry, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.131, Issue 12, pp.1301-1309, 2005.12.
- 7) Anthony Webster, Steven Feiner, Blair MacIntyre, William Massie, and Theodore Krueger: Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation. *Proc. of the ASCE third congress on computing in civil engineering*, Anaheim, CA, June 17-19, 1996, pp.913-919.
- 8) 河口将弘, 呂煜鉉, 加賀有津子, 福田知弘: オンサイト型環境デザインツール「タブレット MR」の構築, 第 29 回情報システム利用技術シンポジウム論文集, 日本建築学会情報システム技術委員会, pp.61-66, 2006 年.
- 9) ARToolKit: <<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>>, (入手 2006.5.) .
- 10) 佐藤清秀, 内山晋二, 田村秀行: 複合現実感における位置合わせ手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.2, pp.171-180, 2003 年 6 月.
- 11) OpenGL: <<http://www.opengl.org/>>, (入手 2006.5.)
- 12) ifcXML : <http://www.iai-international.org/ifcXML2/RC2/IFC2X2_FINAL/ifcXML%20Implementation%20Guide%20v1-0.pdf>, (入手 2005.5.) .
- 13) Ronald T. Azuma: A Survey of Augmented Reality, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol.6, No.4, pp.355-385, 1997.8.

(2007.5.18受付)