

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 課題番号 第 10 号
2. 研究課題名 X線ライナックを搭載した量子ビームロボットを用いた橋梁部材の CT 計測システム
3. 研究期間 平成 22 年度～平成 23 年度
4. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	上坂 充	東京大学 教授
研究代表者	上坂 充	東京大学 教授
共同研究者	出町 和之	東京大学 准教授
	藤原 健	東京大学 助教
	木村 嘉富	土木研究所構造物メンテナンス研究センター 上席研究員
	田辺 英二	株式会社 アクセセラ 代表取締役社長

5. 補助金交付総額 27,690 千円

6. 研究・技術開発の目的

昨今の社会的要請として橋梁の老朽化に伴い、そのメンテナンスが重要な課題となってきた。橋梁の寿命延長・保全・品質確保のため、構造物の亀裂や減肉検査、支柱等の腐食検査などには検査に伴う莫大な費用が発生している。図 1 に国内における橋梁の経年分布を示す。1960 年代～1970 年代の高度経済成長期に建設された多数の橋梁が、建設後 40～50 年を迎え経年劣化による橋梁の落橋や床材の抜け落ちが問題となっている。

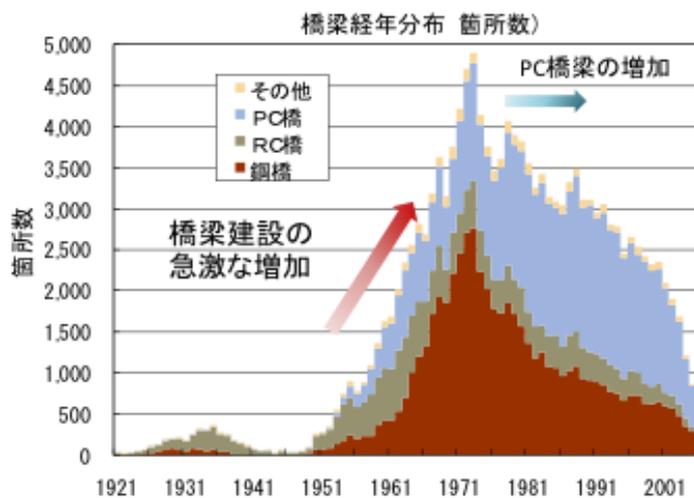


図 1. 国内における橋梁の経年分布

このため重大事故を未然に防ぐために橋梁を定期的に検査する等の抜本的な対策が求め

られている。従来技術として非破壊検査用 X 線源やその他の非破壊検査装置があるが装置が大型、定位置式がほとんどでありオンサイトで利用は出来なく、また価格も高い。そのためその場で精度良く検査できる、小型の高エネルギー X 線 CT 装置開発が求められている。そこで本研究では橋梁に対して適用可能な X 線 CT 装置のハードウェア・ソフトウェアの開発を行うことを目的とする。図 2 に本研究で開発する X 線 CT 装置の概要を示す。

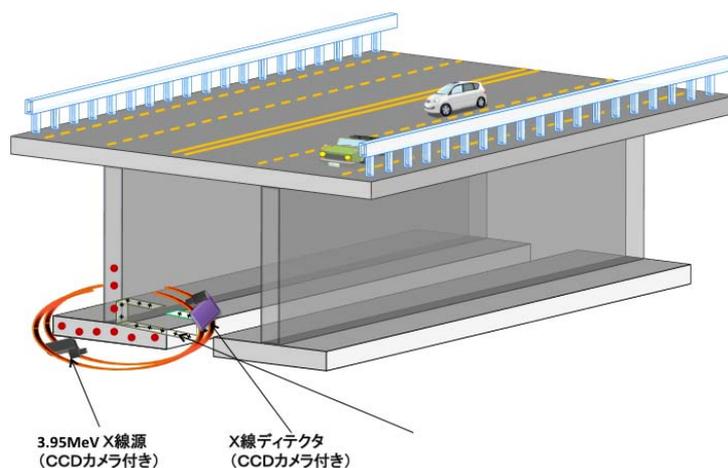


図 2. X 線 CT システムの概要

### 6.1 X 線 CT ハードウェアの開発

電子ビームエネルギーを 3.95MeV に特化した X 線発生装置を用いることで、放射線障害防止法に基づく管理区域の設置が必要無く、装置を直接、工事現場等で使用が可能になる。本研究では、3.95MeV X バンドライナック X 線源による PC 橋梁の非破壊検査システムの評価、40 cm の PC 橋橋桁の X 線透過試験と結果解析、そして部分 CT 撮像法の研究を行った。図 2 に本研究で用いた 3.95MeV X-Band ライナックの外観を示す。



図 2. 3.95MeV X-Band ライナック外観

## 6.2 X線 CT ソフトウェアの開発

CT とは、対象物を挟んで対に配置した放射線源と放射線ディテクタを、対象物を中心に回転しながら計測を行い、対象物内部の 3 次元構造を画像化するシステムである。回転しながら測定したデータをフーリエ変換することにより、構造物の損傷や劣化などの内部構造を可視化できる。従来の CT はその主な用途は医療現場であったが、CT の原理は人体に限らずあらゆる物体の内部構造診断に使用できる。また、従来のように放射線源と放射線ディテクタの位置を固定した回転体による撮像を行わなくても、適切な位置に放射線源と放射線ディテクタを配置することができれば、原理的には同様の CT 画像が得られる。

CT 技術に必要な 3 つの要素は、

- ① 十分なエネルギーの X 線源
- ② 測定のスPEED
- ③ 放射線源と放射線ディテクタの正確な位置制御（把握）

である。上記のように、従来の CT では③は放射線源と放射線ディテクタの位置を固定した回転体を製作して行われていたため、モーター、回転軸受、回転体のケーシングなど装置が大型となり、コストが大きくなっていた。

本研究では、③の解決を CCD カメラ映像の画像処理により行うため、回転体は必要とせず、装置の小型化が図れることからコストの低減が期待できる。本システムの導入により、これまで作業員が行っていた高所の検査がロボットで行えることになるため作業員の安全向上につながるとともに、これまで必要だった足場を組む作業などが不要となるため、工期短縮、コスト低減に繋がる。

## 7. 研究・技術開発の内容と成果

### 7.1 X線透過試験

実際の現場での測定を想定し、実際の橋梁から切り出した 40cm 厚のサンプルの X 線透過試験を 3.95MeV X-Band ライナックを用いて行った（図 3）。この橋桁は幅が 40 cm で、直径 12 mm の鋼材ワイヤが数本と直径 7 mm の鋼材ワイヤが 12 本束で 5 か所入っている。そこで、比較用としてこのサンプルのディテクタと近い側に直径 10 mm のワイヤを配置し、X 線透過画像の測定を行った。その X 線透過画像を図 4 に示す。図から直径 7 mm ワイヤブロックと比較用の直径 10 mm ワイヤが確認できる。ワイヤブロック③はワイヤブロック①と②に

比ベ線源中心がから離れているため、識別が困難である。また、ワイヤブロック①と②は直径 7 mmワイヤが 12 本入っているにもかかわらず 3 本しか確認できない。そこで測定サンプルの角度と直径 7 mmワイヤの配置を変えて測定を行った結果、透過画像に映っている 3 本は 12 本のワイヤが重なった結果であることが分かった。つまり、12 本すべてのワイヤについて 1 本ずつその状態を確認するためには CT による撮像が必要になる。図 5 からは直径 12 mmのワイヤが確認できる。また、新しいワイヤ特有の表面凹凸まで確認でき、健全性を評価するには十分な分解能を有していることができる。また、直径 12 mmのワイヤについて深さ 3 mm人為的に欠損を与え、サンプル中に設置し測定を行った。その X 線透過画像を図 6 に示す。この透過画像から 3 mmの欠陥を確認することができ、減肉だけでなく部分的な欠損も検出可能だということが確認できた。なお、すべての測定は加速器の高周波繰り返しが 50pps で、測定時間 10s~20s で行った。

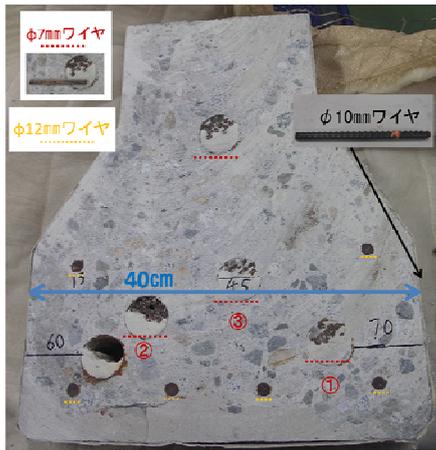


図 3. 直径 40cm の PC 橋サンプル

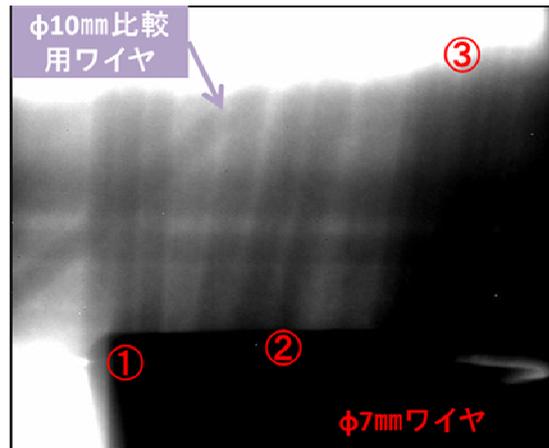


図 4. X線透過画像(FPD で取得)

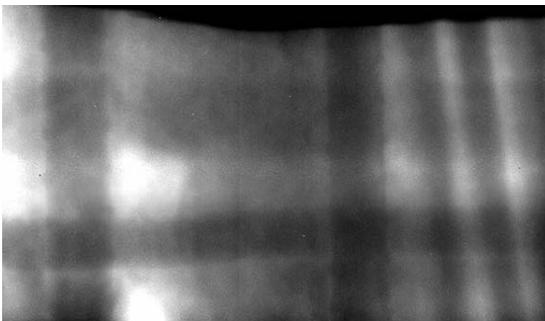


図 5. 透過画像画像の拡大図

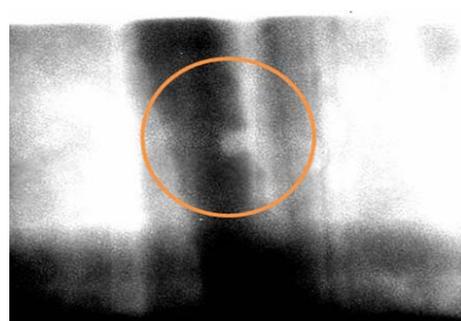


図 6. 3mm 欠陥を与えた鉄筋の透過画像

## 7.2 部分 CT 手法の開発

橋桁の健全性を定量的に評価するには前述のとおり単純な透過試験では、束になった鉄筋の評価ができず不十分である。そのため CT による内部構造の詳細な評価が必要となる。しかし、橋梁は図 7 のように橋桁のある部分は、上下が橋梁部材で覆われているため 360 度の CT 撮像は不可能である。そのために、本研究では角度が限定されていて、さらに部分的な照射のみで内部の健全性評価を行う部分 CT の手法の開発に取り組んだ。

本研究では角度と照射部分が限定されている場合でも CT イメージを再構成するために Filtered back projection (FBP) 法と Algebraic iterative reconstruction (AIR)法を用いた再構成の研究を行い、それぞれの手法をコンピュータシミュレーションとコンクリート試験片を用いた実験の両方で検証した。図 8 にシミュレーションに用いた橋梁サンプルの実サンプルの写真と、シミュレーション用の入力値、そして本研究で用いたライナックの視野角で対象物全域をカバーするために用いた Translation 移動式再構成法について示す。

図 9 にスキャン角度 120 度、180 度、Translation 移動式再構成法を用いた場合・用いなかった場合の結果を示す。Translation 移動式を用いた結果は全域をカバーできているため端の鉄筋まで綺麗に再構成可能であるが、Translation 移動式を用いなかった場合でも中心部分に限っては十分評価可能であることが立証された。次に実機を用いての透過画像試験・CT 再構成試験を行った。図 10 に鉄筋入りのコンクリート片、アルミ柱、乾電池、鉛片のサンプルを用いた際の透過画像を示す。図 11 は FBP 法を ART 法をそれぞれ 120 度の回転角で再構成した結果である。いずれも 120 度の回転角にも関わらず重元素の分布をクリアに再現しており、120 度の回転角があれば十分に健全性評価が可能であると言える。また、検証の結果 ART 法は FBP 法に比べてゴーストが少なく、部分 CT を行う際により適していると言える。

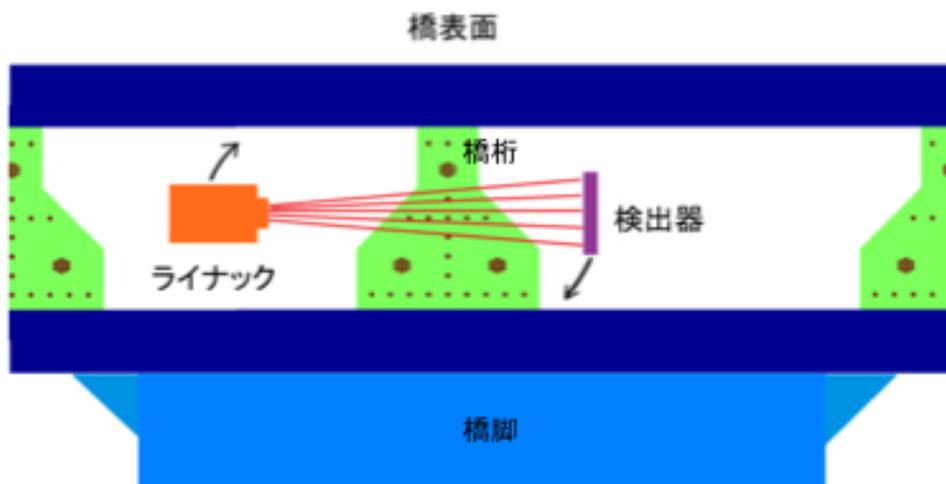


図 7. 橋桁部分と部分 CT の模式図

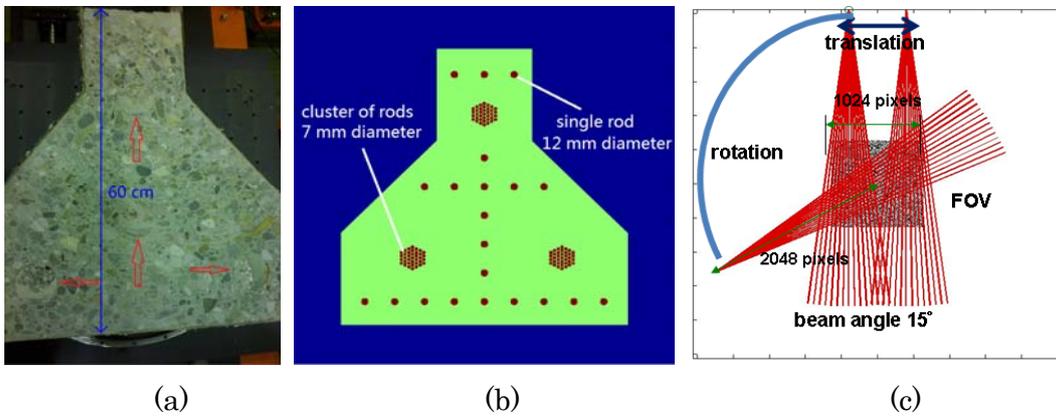


図 8: (a) PC 橋サンプルの写真; (b)シミュレーション用の PC 橋サンプル入力値; (c) Translation 移動式再構成法の概要

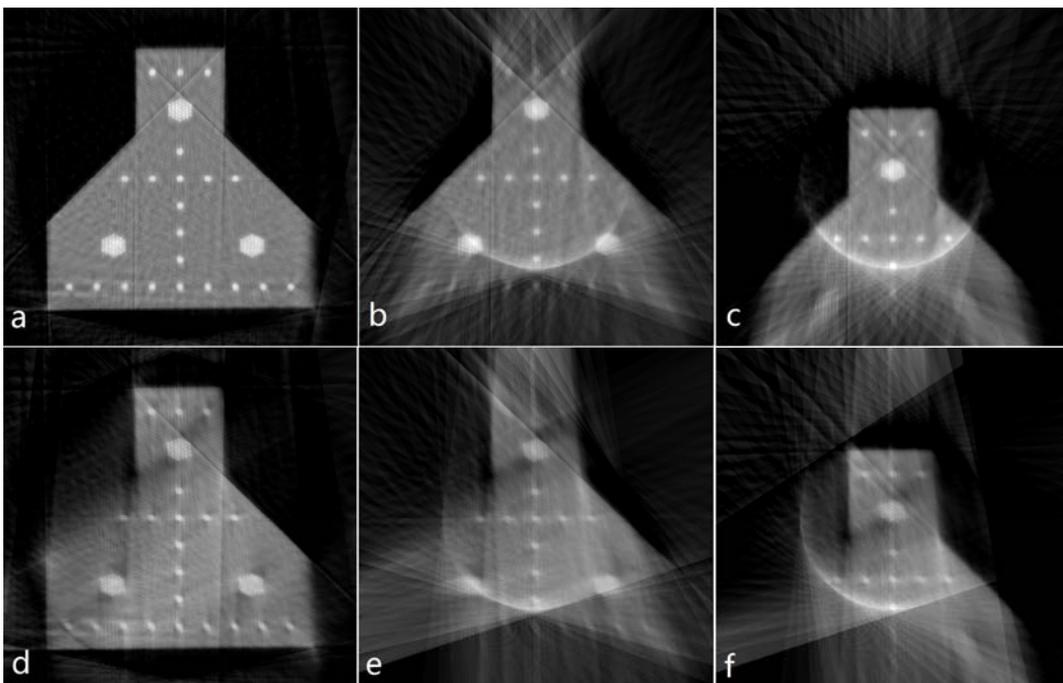
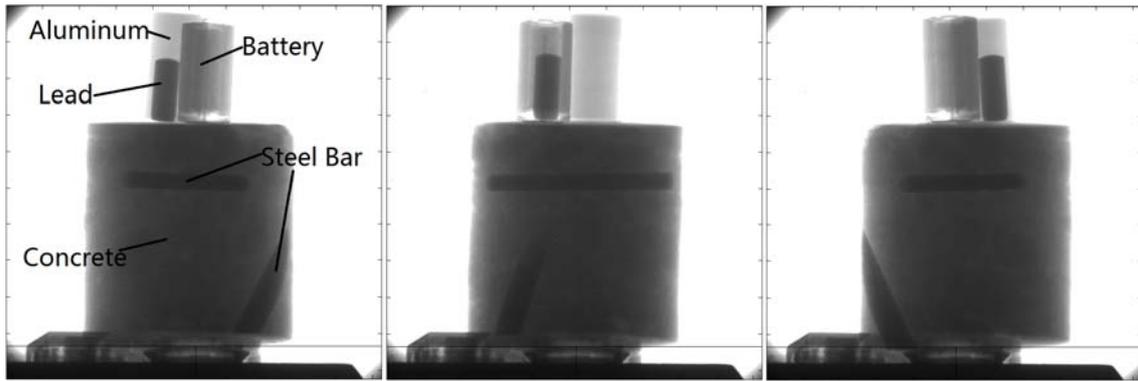


図 9: (a-c) 180 度の CT スキャンによる再構成結果; (d-f) 120 度の CT スキャンによる再構成結果; (a, d) 3 段階の Translation 移動式を用いてサンプル全域をカバーした際の再構成結果; (b, c, e, f) 移動なしの再構成結果



(a)

(b)

(c)

図 10: 950 keV での原理実証：鉄筋入りのコンクリート片、アルミ柱、乾電池、鉛片  
 (a) 正面からの透過画像; (b) 90 度回転させた透過画像; (c) 180 度回転させた透過画像

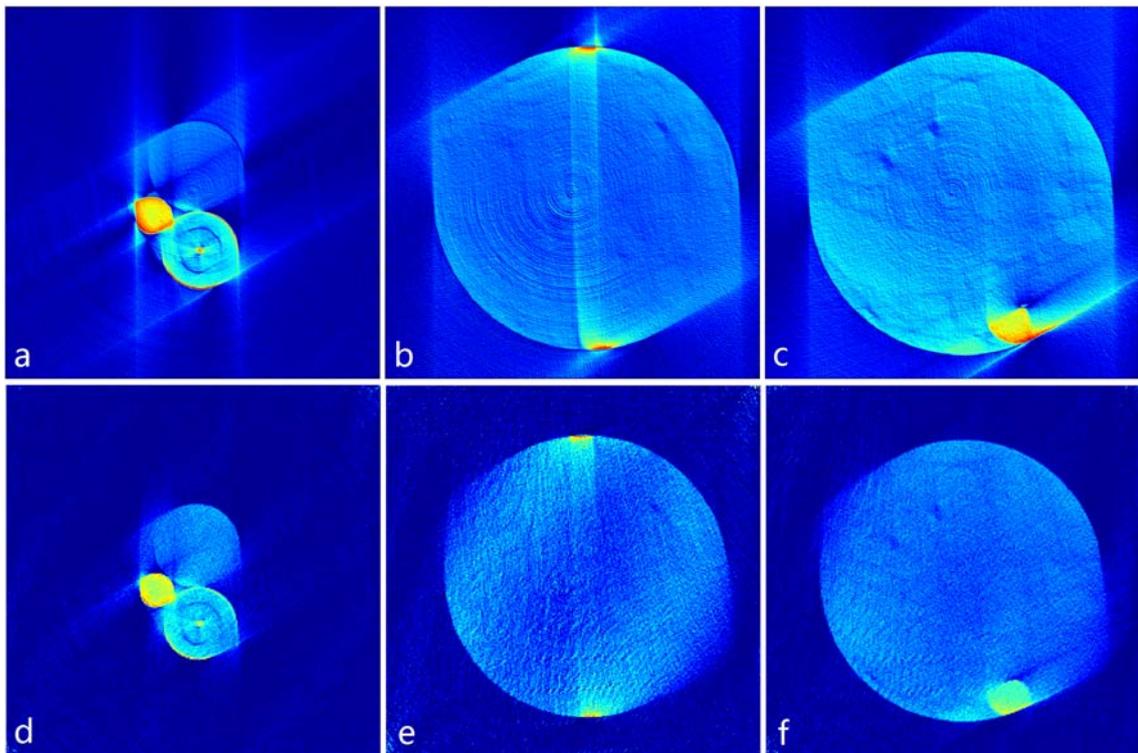


図 11: 120 度のスキャンで画像再構成した結果 (a-c) FBP 法; (d-f) ART 法、(a,d)鉛片、乾電池、アルミ柱 (b,c,e,f) 鉄筋入りコンクリート片

### 7.3 CCD カメラを用いた位置決めシステムの開発

一方、CT を屋外で実現するには、X線源と検出器を固定し、同時動かすという作業が必

要になるが、橋梁のような大規模な構造物を対象とした場合、そのようなシステムは現実的ではない。そこで本研究では、CCD カメラによる画像から検査対象である試験片の位置情報を取得する手法の開発も行った。具体的には、試験片表面にマーカーを貼り付け、2機のCCDカメラによる画像からCCDカメラとマーカーとの相対的な方角を算出し、その交差する点としてマーカーの3次元的位置を同定するという方法である。検査対象物表面にマーカーを均等間隔で複数枚貼り付けることにより、マーカーの3次元位置が同定できれば検査対象物の3次元位置も把握することが可能となる。図1 1に、試験片 x-2 の表面に張り付けたマーカー（赤、緑）を示す。

CCD カメラでこのマーカーを撮影した画像の画素データから、今回は試験体の回転角度を解析により求めた。試験片を載せた $\theta$ ステージの実際の角度（コントローラ入力値）との誤差を図1 2に示す。この結果より、マーカーとカメラのみで高精度に位置を同定できていることが示された。誤差は $\pm 3\%$ 以内に収まっており、独立したCCDカメラでも高精度な位置同定が可能であるといえる。CT画像の再構成に要求される精度を満たすにはシステムの改良が必要であるが、マーカーの設置位置の最適化等で対応できると考えられ、本研究によりCCDカメラ・可搬型ライナック・部分CTを組み合わせることで橋梁のX線CT検査を可能とする見通しが得られた。



図1 1:試験片に張り付けたマーカー（赤、緑）

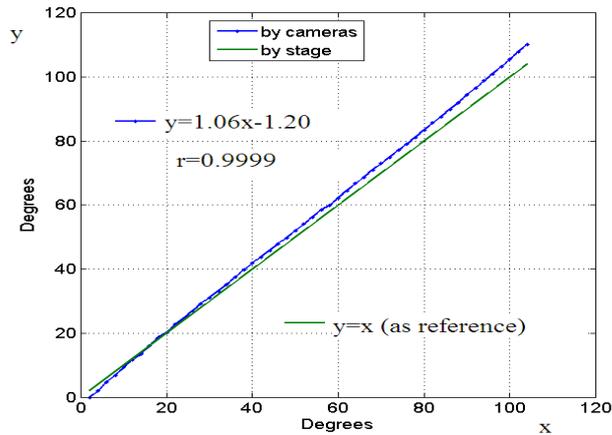


図 1 2 : 試験体の回転角度と、 $\theta$  ステージの実際の角度（コントローラ入力値）との誤差

#### 8. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名 (雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
検査技術, Vol.17, No.2	平成 24 年 2 月 1 日	日本工業出版	藤原 健
Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A, NIMA53737	2011 年 7 月 26 日	Elsevier	Mitsuru Uesaka
IPAC Proceedings 2011	2011 年		金 海峰
IPAC Proceedings 2011	2011 年	IPAC	金 明

#### 9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
なし	なし	なし	なし	なし

#### 10. 成果の実用化の見通し

これまでの結果から 3.95MeV ライナックから発生する X 線は 40cm 厚のコンクリート材

を撮像するのに十分なエネルギーを持っていることが分かっており、本研究で開発した部分 CT 撮像アルゴリズムと CCD カメラを用いた位置同定システムにより、機器・手法自体は十分に要求性能を満たしている。課題となるのはライナックと検出器を搭載し、移動するロボットの作成であり、その課題が解決されれば、経年劣化が懸念される橋梁や首都高などの非破壊検査が高速・高精度で行えると考えられる。

## 11. その他

なし