

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月14日現在

機関番号：55201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22500979

研究課題名（和文）遠隔操作型坑道探査システムを用いた鉱山坑道の定量的解析

研究課題名（英文）Quantative Analysis of Mining Tunnels using Remotely Controlled Robot

研究代表者

久間 英樹 (KUMA HIDEKI)

松江工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：40259924

研究成果の概要（和文）：本研究では、世界遺産に登録された島根県石見銀山をはじめ新潟県佐渡金銀山等、全国6地域、約50カ所の坑道内を独自に製作した遠隔操作型ロボットを用いて調査してきた。ロボットには、CCDカメラ、レーザ測域センサ等各種センサが搭載されている。これにより内部の映像や断面形状、採掘方向、傾斜角、坑道内体積等、従来得ることができなかった坑道内の定量データを取得することが可能となった。この結果、坑道の断面形状と傾斜角の関係からある程度採掘年代を推論できるようになった。

研究成果の概要（英文）：In this research, we obtain the quantitative data of mining tunnels all over Japan (Iwami Silver Mine and Sado Gold and Silver Mine etc.) using our original remotely controlled robots and show the changes for the cross section shape of them over ages that can be estimated based on those data. One of the results we have is that controlability and lightness are especially important for the robots dedicated to mining tunnel investigation. We have confirmed that the robot arm equipped against rolling of the robot can greatly increase the controlability. We believe that the data our system can provide for the cross section shape enables us to estimate the digging age and method of mining tunnels that prevent us from entering.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：文化財科学・文化財科学

キーワード：遺跡探査

1. 研究開始当初の背景

2007年世界遺産に登録された「石見銀山遺跡」に代表される日本の鉱山跡には、間歩(マブ)と呼ばれる坑道跡が数多く存在する。これらは戦国時代後期から江戸時代にかけて採掘されたため坑道は非常に狭く、崩落などの危険性があることから立入禁止となっ

ている。そのため従来の坑道調査は古文書や入口付近の形状を検討することによって、当時の採掘方法等を推定していく手法であった。

2. 研究の目的

研究目的は、各鉱山の価値を定量的に再評

価することである。具体的には、独自に開発した遠隔操作型ロボットに各種センサを取り付け、坑道内部の断面形状、採掘方向、傾斜角を採取し、これら定量データを元に採掘時の状況を解明する新たな坑道探査手法を提案することである。

3. 研究の方法

(1) 探査システム

探査システムの構成を図1に示す。坑道内部の様子を記録するために、ロボット上部に CCD カラーカメラ、坑道内部形状の非接触計測を行うためにレーザ測域センサ、坑道の採掘方向および傾斜を計測するために方位角・傾斜角センサを取り付けた。ロボットの操作は、操縦者が CCD カメラから送られてくる映像データをモニターで確認しながら、コントロールボックスを介して行う遠隔操作型とした。またロボットとコントロールボックスは各種信号線および動力線が結束されているケーブルで接続されている有線型である。これは坑道が狭小のため市販されている無線装置では乱反射をおこして 5 m 程度の範囲しか操作できないためである。

CCD カメラは、坑道の大きさを考慮して市販されている小型カメラ（マザーツール製 41 万画素 KCC-410B）やハイビジョンカメラ（SONY 製 HDR-HC7 または HDR-CX170）を取り付けた。レーザ測域センサ（北陽電機製 URG-04LX）は、坑道内部形状を非接触で計測するために用いた。本センサは、1 回の計測でセンサを中心とした $\pm 135\text{deg}$ の平面内の距離情報が 2 次元座標データとして獲得できる。具体的には、レーザ測域センサとパソコンを接続するケーブルに等間隔（L）で印をつけ、ロボットを L 進める毎にパソコンを介してレーザ測域センサからその時点での坑道断面形状の 2 次元座標データを取得する。探査終了後、パソコン上で L を考慮して 2 次元座標データを重ね合わせて坑道の 3 次元散布図化を行うことができる。また、方位角・傾斜角センサ（パイテック製の TDS01V）は、坑道の採掘方向や傾斜を計測するために用いた。

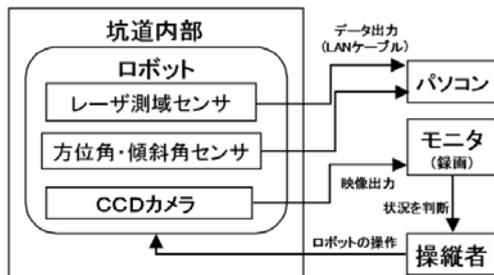
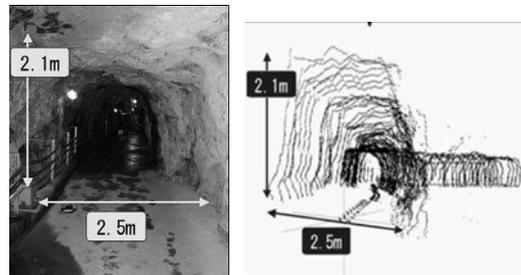


図1 探査システム構成

この手法を用いて生野銀山の観光坑道内部を計測した結果を図2に示す。(a)は計測開始位置での画像データ、(b)は3次元散布図である。坑道の形状や進行方向に向かって右側に約90deg曲がっている様子が現れている。このデータは公開されている坑道内の図面と一致している。これより坑道内部の計測にも十分利用できると思われる。



(a) 坑内画像 (b) 3次元散布図

図2 生野銀山観光坑道内計測

(2) 探査ロボット概要

探査ロボットは坑道の構造に合わせて2つのタイプを製作した。第1は図3に示す水平坑道対応型ロボットである。中央部に岩や地面の凹凸が干渉して転倒するのを防ぐため、両軸ギヤヘッド付のDCモータを用いて、ロボットの内側にも小型の車輪を取り付ける構造とした。しかしながら、障害物に乗り上げてしまった場合、逆上りをするようにロボットが横転する問題が発生した。このため前後のモジュール間を自己保持力の優れている板バネで連結することを考案した。また軽量化を図るため車輪の素材は一般的に広く用いられるゴム材ではなくバスマット等に使用されるエチレン-酢酸ビニル共重合樹脂材を用いた。走破性を向上させるため車輪の側面に凹凸を取り付けた。製作したロボットの重量は4kgであり、平坦地における移動速度は約0.08m/sであった。

第2は下向き坑道対応型ロボットである。図4に示すように基本的な構造は水平坑道対応型ロボットと同じである。走破性を高くするため車輪の形状を円形から楕円形とした。また、水平坑道対応型と同様、前後のモ



図3 水平坑道対応ロボット

ジュール間に板バネを用いた。人の手で吊り下げるため、水平坑道対応型ロボットよりコンパクトにして、軽量化を図った。そのため小型の CCD カメラを搭載した。製作したロボットの重量は 1.5kg であり、平坦地における移動速度は約 0.16m/s であった。更に、坑道内には想定外の鉱石片が散乱している場合がある。そのため、板バネではロボットの姿勢を一定に保持できず横転する場合があった。そこで両タイプのロボットとも、ロボット後方に回転可能なアームを付加した。この機能により操作性が格段に向上した。

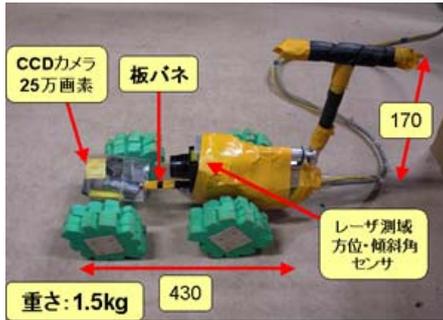


図4 下向き坑道対応ロボット

4. 研究成果

(1) 石見銀山

石見銀山は、16 世紀から 20 世紀にかけ、およそ 400 年にわたって採掘がなされた世界有数の鉱山である。日本の銀は全盛期には世界流通量の約 1/3 であった。中でも石見銀山の産銀は大きかったといわれている。現在 600 以上の坑道跡が存在する。今回は、異なった形状の 2 カ所についての探査結果を紹介する。

① 1 号間歩

1 号間歩は、石見地区仙ノ山頂上に存在する。16 世紀前半の銀山発見以来の大規模な鉱山遺跡である。1 号間歩の付近には選鉱施設跡、集落跡や寺院跡などが発掘されている。坑口形状は図 5 に示すように三角型である。CCD カメラの映像データから図 6 に示す様に 1 号間歩内部構造を推測した。坑口の三角形が内部まで続き、場所により多少大きさが変化するが概ね同じ大きさのまま奥まで掘られていることがわかった。坑口付近にはいくつか別方向に掘られた跡があったが、どれもそれほど深く掘られてはいなかった。約 12m 奥に進んだ地点に下向き坑道を確認した。図 7 にレーザ測域センサから得られた 3 次元散布図を示す。この結果から坑道内体積は 4.14m³ と算出できる。

図 8 は、方位角センサから算出した採掘方向を表している。仙ノ山地区の鉱脈方向である東西と一致している。図 9 は、傾斜角センサから算出した 1 号間歩を仮想的に横から見た図である。その結果、1 号間歩は平均斜度

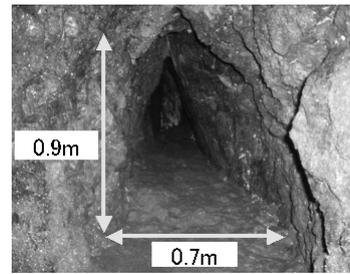


図5 坑口画像

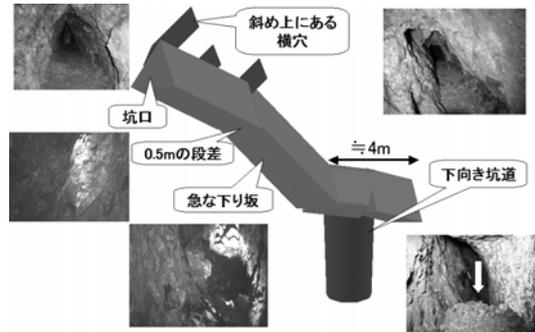


図6 坑道内部推測図

約 35deg とかなりの傾斜があることが確認できた。

これより本坑道は戦国時代後期に鉱脈を追って掘り進んだ斜坑であると推測できる。また次式のような坑道内体積から銀産出量 q を推測する次式を新たに提案した。

$q = V \times \rho \times c \times y$ (V は体積、 ρ は岩石の密度、 c は銀含有比、 y は選鉱と製錬過程での歩留り) この式から今回探査を行った空間の銀産出量は約 4.9kg と推測される。

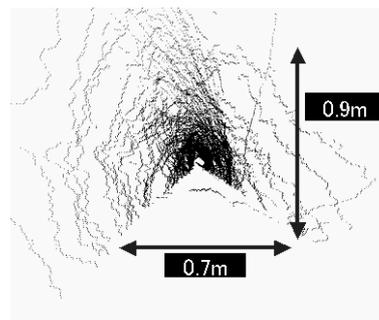


図7 3次元散布図

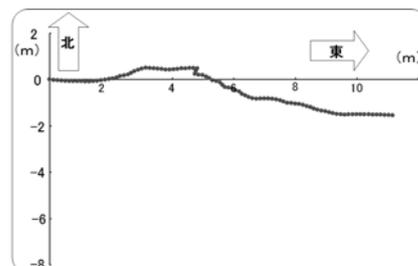


図8 採掘方向

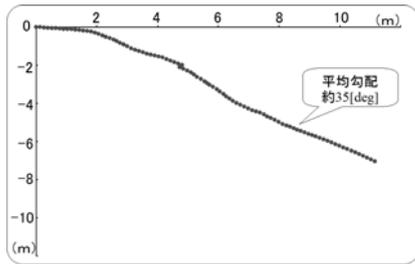


図9 傾斜角

② 82号間歩

82号間歩は、仙ノ山中腹本谷地区釜屋間歩付近にある。釜屋間歩付近は慶長年間に発見・採掘され、石見銀の産銀量が飛躍的に増したといわれている。坑口形状は図10に示す矩形型である。この型は江戸時代における採掘断面形状の定型である。

CCDカメラの映像データから図11に示す様に82号間歩内部構造を推測した。坑口付近の矩形形状が内部まで続いていることや壁面や天井の岩肌が綺麗に整えられていることがわかった。また、奥に進むにつれ、坑道がいくつか分岐していることや分岐した先が崩落していることもわかった。坑口から約25mで行き止まりになっていた。また傾斜センサの値かほぼ水平に採掘されていることが確認された。これより本坑道は江戸時代に採掘された試掘坑であると考えられる。図12にレーザ測域センサから得られた3次元散布図を示す。この結果から坑道内体積は6.08 m³で銀産出量は約7.3kgと算出できる。



図10 坑口画像

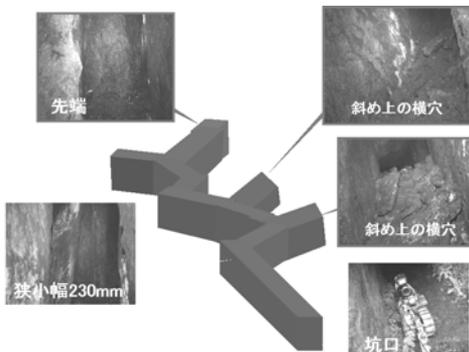


図11 坑道内部推測図

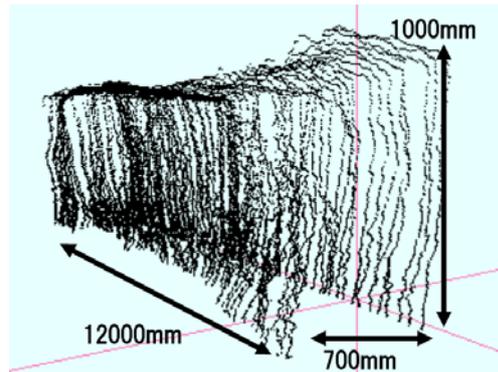


図12 3次元散布図

(2) 佐渡金銀山

新潟県にある佐渡金銀山は、17世紀から約400年間に金約78t、銀約2300tを産出した日本最大級の金銀山である。今回探査を実施した「鶴子銀山」は、1542年に発見され、1592年には石見銀山から来た山師によりトンネルのように山を採掘する「坑道掘り」が採用され、採掘量が飛躍的に多くなったといわれている。本報告では、図13に示す鶴子銀山内の「弥吉間歩」の探査結果を記載する。

はじめに水平坑対応型ロボットを進入させ探査を行った。CCDカメラより得られた坑道内推測図を図14に示す。坑口は、三角形をしているがその後、図15(a)に示す大きな矩形の坑道が続き、約6m付近に坑口の大きな第1下向き坑道が存在した。更に図15(b)に示すアーチ形の水平坑道が約3m続き、矩形の第2下向き坑道が存在した。その奥に図15(c)に示す矩形の水平坑道が続き、円形の第3下向き坑道が存在した。坑口から第3下向き坑道まで約27mであった。また④水平坑には、坑道の真ん中に溝のようなものが掘られていた。これが坑道内の排水を目的としたものか、坑夫の往來を助けるための物かは、古文書等に記載がないため今回の探査では確定できなかった。

水平坑の探査終了後安全が確認された後、下向き坑道付近の水平坑道から竿の先端に取り付けた滑車を介して下向き坑道対応型ロボットを進入させた。その結果、図16(a)に示す第1下向き坑道は、傾斜角約60degの「すり鉢」形をしていることや渡し木が19本現存することが確認できた。また深さ約16mに透明度の高い水が溜まっていることもわかった。第2下向き坑道は、傾斜角約20degで断面が矩形であり、約4mで行き止まりであった。図16(b)に示す第3下向き坑道は、傾斜角約80degで断面が円形状で約4mの下ったところに渡し木があり、その下に広い空間があることが確認された。

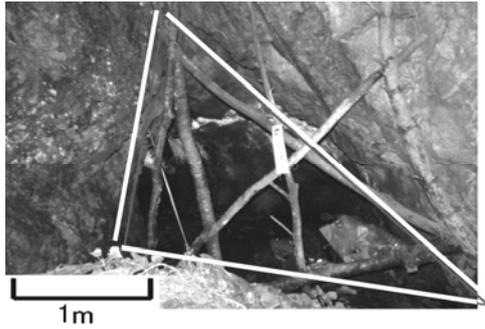


図 13 坑口画像

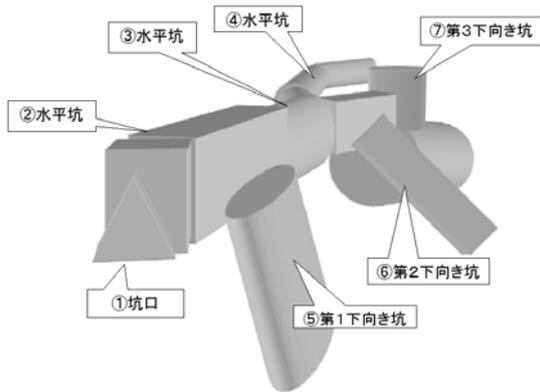
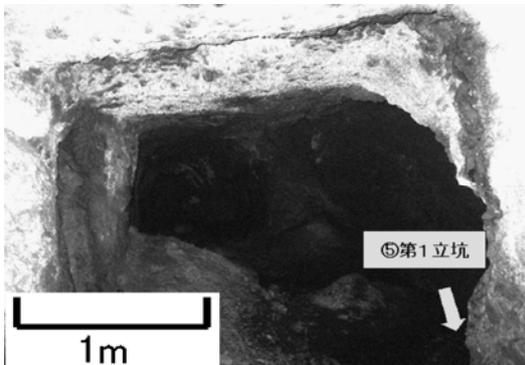
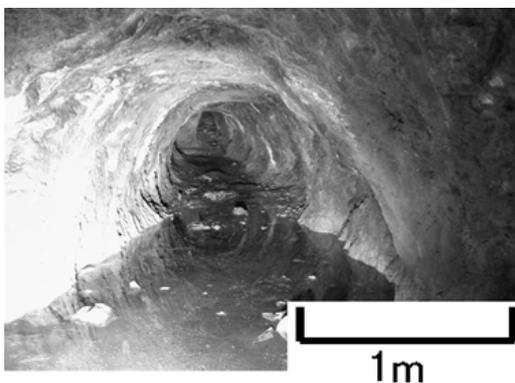


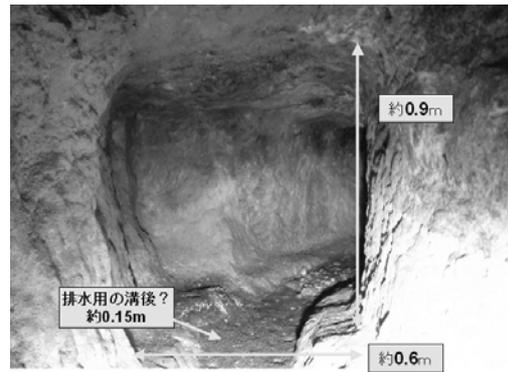
図 14 坑道内部推測図



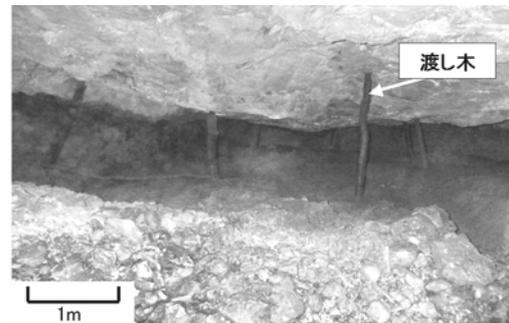
(a) ②水平坑付近



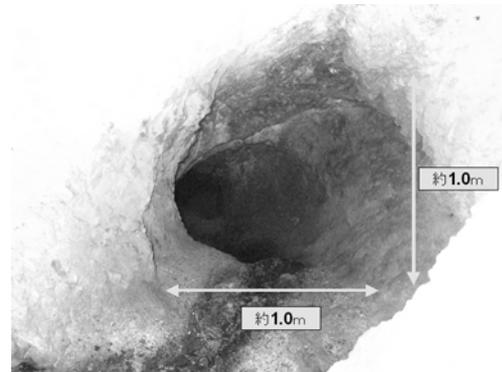
(b) ③水平坑付近



(C) ④水平坑付近
図 15 水平坑画像データ



(a) ⑤第1下向き坑道内部

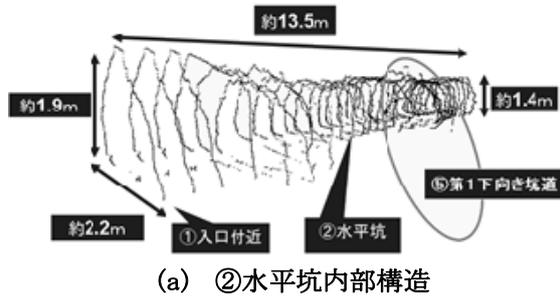


(b) ⑦第3下向き坑道内部
図 16 下向き坑道画像データ

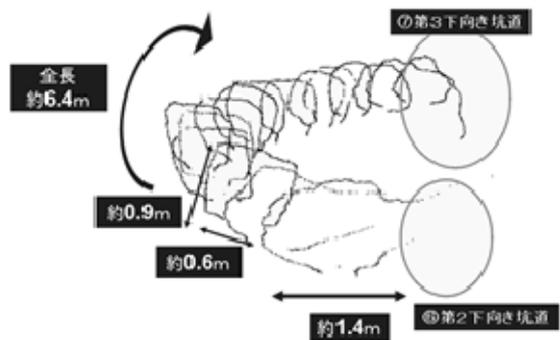
次にレーザ測域センサから得られたデータを元に坑内を3次元散布図化した結果を図17に示す。これより坑内は、CCDカメラの映像データと同様に複雑な構造をしていることがわかった。この結果より水平坑内部の体積は、②水平坑が約 39m^3 、③水平坑が約 4.3m^3 、④水平坑が約 3.8m^3 であることがわかった。

また下向き坑道に関しては、図18に示す第1下向き坑道が約 72m^3 、第2下向き坑道が約 2.2m^3 、図19に示す第3下向き坑道が約 4.3m^3 であることがわかった。採掘体積

は第1下向き坑道が最も大きく入口付近にこれほどの大きな下向き坑道が存在する坑道は、いままで探査した鉱山では発見されていない。

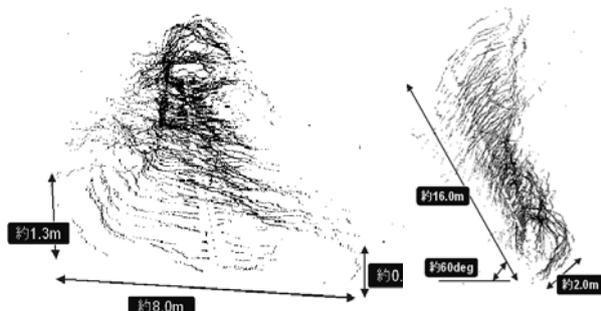


(a) ②水平坑内部構造



(b) ④水平坑内部構造

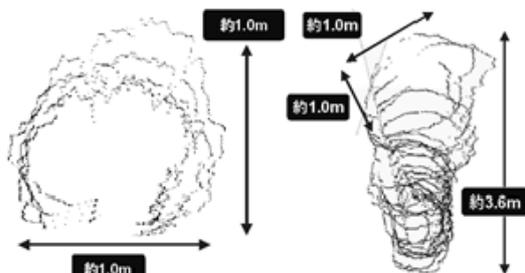
図 17 水平坑 3次元散布図



(a) 正面図

(b) 側面図

図 18 第1下向き坑道 3次元散布図



(a) 正面

(b) 側面

図 19 第3下向き坑道 3次元散布図

(3) まとめ

本研究では、各種鉱山の価値を定量的に再評価するため、坑道内を非接触で計測できる遠隔操作型ロボットを開発した。これにより坑道内部の映像や採掘方向、形状、体積等、定量データを取得することが可能となった。

これらデータを用いて、従来は不可能であった坑道内部構造を定量的に把握できるようになった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ①久間英樹、福岡久雄、廣瀬誠、遠隔操作型ロボットを用いた佐渡金銀山坑道探査—鶴子銀山編一、技術史教育学会誌、査読有、Vol. 14, No. 2, 2013, pp. 43-48
- ②久間英樹、福岡久雄、廣瀬誠、「遠隔操作型ロボットを用いた鉱山立坑の形状計測」、技術史教育学会誌、査読有、Vol. 13, 2011、No. 1, pp. 9-14
- ③久間英樹、高橋勇作、福岡久雄、「鉱山立坑の形状計測システム」、日本鉱業史研究誌、査読無、Vol. 60, 2011, pp11-18

[学会発表] (計12件)

- ①久間英樹、遠隔操作ロボットを用いた鉱山坑道探査～坑道映像とともに佐渡金銀山の凄さを語ろう！～、2012年度日本技術史教育学会全国大会 特別講演、2012.10、新潟県中央図書館
- ②久間英樹、福岡久雄、廣瀬誠、遠隔操作型ロボットを用いた古代鉱山/近世鉱山の坑道調査、平成24年度資源・素材学会秋季大会、2012.9、秋田大学鉱物博物館
- ③久間英樹、皆尾登志美、高橋勇作、福岡久雄、生野銀山立坑の構造解析が可能となる遠隔操作型ロボットの開発、第28回ロボット学会学術講演会、2010.9、千葉工業大学

[その他]

ホームページ等

http://www2010.matsue-ct.ac.jp/control/old/link2/kuma_lab/g-kuma-HP/k-iwami1.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久間 英樹 (KUMA HIDEKI)

松江工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：40259924