

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：55201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350398

研究課題名(和文) 鉱山の坑道形状から採掘年代を推論する方法の研究

研究課題名(英文) Method to reason from the shape of the mining tunnels in terms of mining age

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では3次元レーザスキャナを用いて坑道が散在する斜面および坑道内の断面形状、採掘方向、傾斜角、3次元点群データ等の定量データを測定する新たな手法を提案した。これにより坑口付近の様子を3Dプリンタを用いて斜面形状模型として再現することが可能となった。また採掘前の露頭掘跡の再現および採掘体積の算出も可能となった。これらの結果から、坑道内の断面形状、傾斜角、採掘体積等の定量データと採掘年代にある程度の相関関係が示唆された。以上より、鉱山遺跡に散在する斜面の定量データ測定に関する新たな手法の有用性が確認できた。

研究成果の概要(英文)：We have already investigated the internal structure of several mining tunnels in Japan using the remote control robots that can perform contactless measurement of them through various sensors.

Specifically we have obtained the following data of each mining tunnel: internal images, cross section shapes, mining directions, mining inclination and so on. Comparison of those data and the description in old documents has enabled us to clarify the characteristics of the shape of mining tunnels in terms of mining age. We propose the novel method to measure the quantitative data of the slope, on which several mining tunnels exist, using 3D laser scanners. Those data enable us to reconstruct the slope model using a 3D printer, especially to reconstruct the shape of open pits and calculate their volume. We have confirmed the effectiveness of our method through the actual measurements for several mines.

研究分野：総合領域

キーワード：遺跡調査 3次元レーザ測定 遠隔操作ロボット

1. 研究開始当初の背景

世界遺産登録をめざす佐渡金銀山は約 400 年にわたって採掘がなされた世界有数の金銀鉱山である。佐渡金銀山は大規模な鉱山にもかかわらず、現在でも中世や近世、近代の坑道跡が現存しており、人類が獲得したほぼすべての鉱山技術を見ることができる。金銀の採掘が行われた坑道の総延長は約 400km である。しかし多くの坑道は非常に狭く、落石などの危険があることから立入禁止となっているため、その内部状況は未解明のままである。従って、昨今問題となっている「環境と技術の関わり方」の指針となるような知見を得るためには、長期間地域の環境と上手く関わり生産活動を行ってきた、各地の金銀鉱山の開発当時の技術を詳細に解明し紐解くことが学術的に重要である。

2. 研究の目的

日本各地には、古代から近代にいたる鉱山坑道跡が多数存在している。これまで申請者は、採掘状況を解明し、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。本研究の要旨は、鉱山坑道の定量データと採掘年代の相互関係を示す相関図を提案し、古文書等資料の乏しい坑道の採掘年代を推論する方法を示すことである。

3. 研究の方法

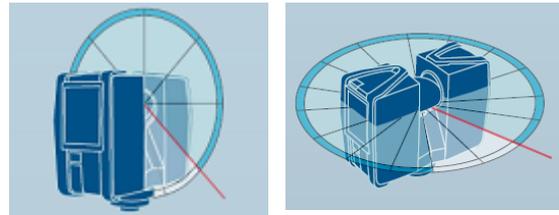
(1) 測定機器

坑道内及び坑道周辺の斜面を測定するために、3次元レーザスキャナを使用した。3次元レーザスキャナの概形および仕様を図1に示す。本測定機は、短時間で複雑な環境や地形の詳細な3次元イメージを生成するレーザ技術を使用している。図2に示す様にスキャナ本体から中央部のミラーを介して照射されたレーザ光は測定対象物に当たってスキャナに戻ってくる。これによりレーザ光の送受信間の位相変移によりmm単位の距離測定が可能となる。また広範囲の3次元測定を行うため、図2(a)の様に中央部のミラーが、垂直方向にレーザ光を曲折させるため垂直方向に305deg測定ができる。同時に図2(b)の様に本体が水平方向に360deg回転する。これにより全方位かつ広範囲の3次元測定が可能となる。得られた距離、垂直角度、



メーカー名	FARO
機種名	Laser Scanner Focus3D
測定距離	0.6~120m
スキャン速度	976000点/秒(最大)
測定精度	25mに対して±2mm
概形	240*200*100[mm]
重量	5kg

図1 3次元レーザスキャナ概形及び仕様



(a) 垂直方向測定範囲 (b) 水平方向測定範囲
図2 測定原理

水平角度から極座標系 (r, θ, ϕ) を算出し直交座標系 (x, y, z) に変換することによって3次元点群データを生成できる。得られた3次元点群データを専用ソフトで合成することによってパソコン上で複雑な地形を再現することが可能となる。但し、本論文で使用するソフトは全て市販品である。

(2) 遠隔操作ロボット

ロボットを用いた坑道調査システムの構成を図3に示す。操縦者はロボットに取り付けられたカメラからの映像をもとにコントロールボックスを介して操作する。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。スキャナも操縦者側から有線LAN接続によって操作し測定を行う。搭載するスキャナの重量は5kgあるため、従来使用していた4輪駆動型のロボットではトルク不足となった。このため図4に示すように6輪駆動構造とした。また両軸モータを使用して内輪を付加することでロボットの底面に岩石等が入った場合でも走行可能となった。本ロボットは前輪部、後輪部、スキャナを搭載する中央部の3つの駆動ユニットから構成されている。

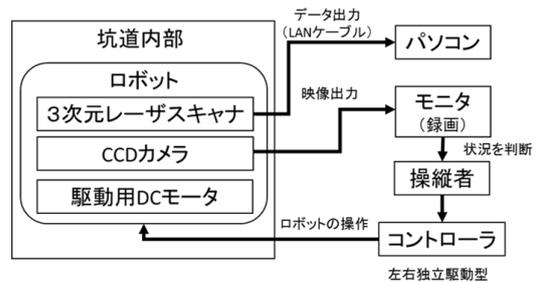


図3 坑道調査システム構成

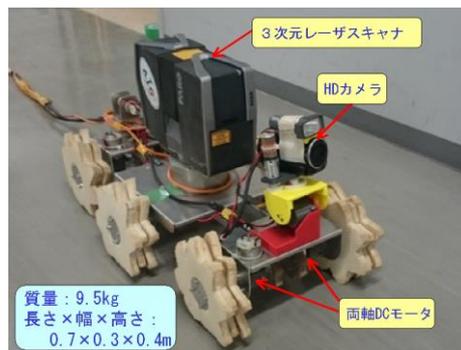


図4 3次元レーザスキャナ搭載6輪型遠隔操作ロボット

(3) 測定方法

①坑道周辺斜面

図5に示すように坑道付近の斜面は、木、倒木等によって見通しが悪い。そのため図6に示すように測定対象となる範囲内を数か所に分けて測定する必要がある。測定した複数の3次元点群データを専用アプリケーションソフト（SCENE ファローージャパン(株)製）を用いてパソコン上で重ね合わせる。測定の際には、目安となるように測定範囲に基準球をランダムに配置する。但し基準球を配置する際には、測定位置から基準球を目視した際に3つ以上確認できることが必要となる。配置する基準球は長さが100cmのピンポールに装着した直径150mmの発砲スチロールを用意した。図7に測定の様子を示す。基準球を斜面に配置する際にはピンポールを地面に突き刺して使用した。



図5 坑道付近斜面の代表的画像

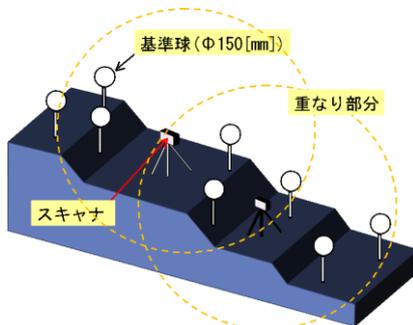


図6 基準球配置図



図7 測定様子

②坑道内の測定方法

坑道内のような狭い場所で測定する場合、図8に示すように3次元レーザスキャナと測定対象が0.6m以内の場合、3次元レーザスキャナから照射されるレーザ光が乱反射

をおこし3次元レーザスキャナに正しく戻ってこない。その結果、図9に示すように3次元レーザスキャナから0.6m以内にある坑道側面は黒く表現されてしまう。この現象を回避するために3次元レーザスキャナと坑道側面までの距離が0.6m以上確保される位置まで移動させ複数回に分けて坑道内を測定する。測定した複数の3次元点群データを①と同様に専用アプリケーションソフト（SCENE）上で重ね合わせることで坑道内を再現することが可能となる。また、坑道内では基準球を設置することが出来ない。このため図10に示すように坑道内の凹凸を特徴点として抽出することで各3次元点群データの重ね合わせが可能となった。

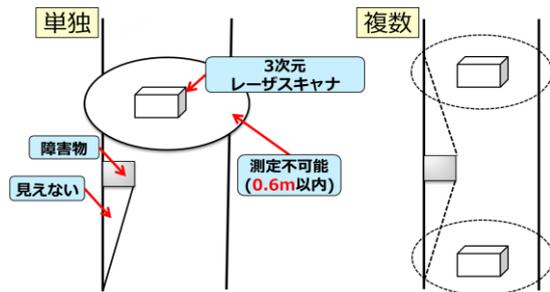


図8 坑道内での測定

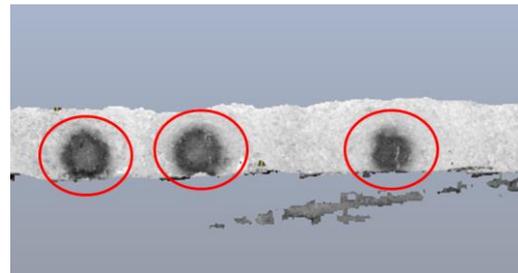


図9 3次元点群データ不正確箇所

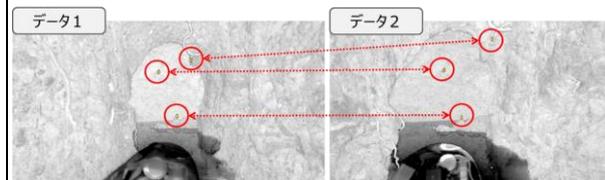
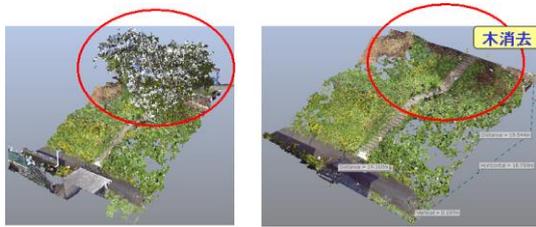


図10 同一点 (特徴点) の抽出

③データ処理方法

本研究の様に坑道が散在する山中で測定を行い斜面のモデル化を行うためには、木、倒木等の不必要なものを除去する必要がある。このために点群データから地面の点群データのみを抽出を行うことができる地面検知処理機能を有する専用アプリケーションソフト（InfiPoints (株) エリジオン製）を用いる。ここで地面検知処理が本研究に使用することが可能か検証を行った結果を示す。図7に示す様に本校敷地内の階段がある斜面で測定を行った。具体的には対象となる斜面を数か所測定し、図11(a)に示すように測定毎のスキャンデータを重ね合わせて斜面の点群データを求めた。その後 InfiPoints

上にデータを転送してあらかじめ用意されている地面検知処理プログラムを動作させ、樹木等が削除され図 11(b)のような地面の点群データを求めることができた。



(a) 地面検知前 (b) 地面検知後
図 11 地面検知処理

具体的な手順を図 12 に示す。重ね合わせたスキャンデータ(a)に地面検知処理を行うと(b)のような地面の点群データを求めることができる。次に専用アプリケーションソフト(Geomagic Design X (株) スリーディー・システム・ジャパン製)を用いて点群データを(c)のような面データに変換する。その際、(d)のような測定不能となりデータが欠落した部分の穴埋め処理を行う。更に面データに底面および側面データを追加し(e)のような立体データを作成する。最後に立体データを用いて3次元プリンタで(f)のような模型を製作する。

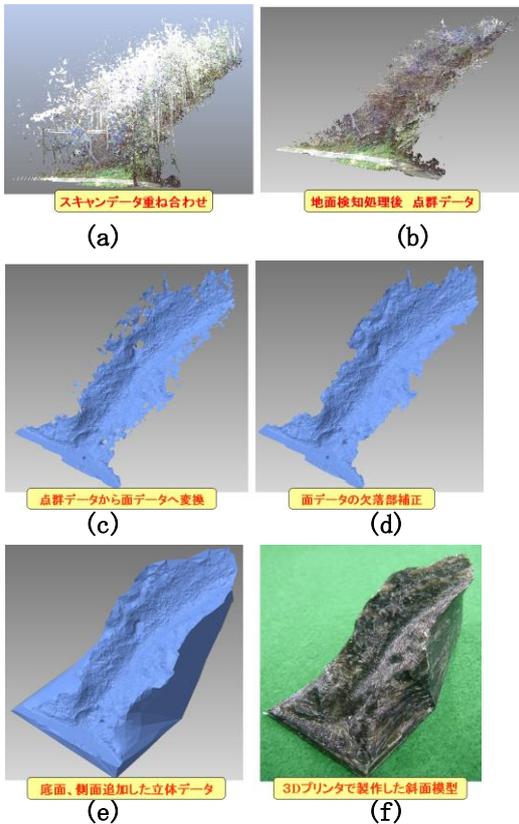


図 12 測定データから3Dプリンタで模型を製作する手法

4. 研究成果

(1) 坑道周辺斜面測定

図 13 に兵庫県多田銀銅山「瓢箪・台所間歩群」の平面図を示す。図 14(a)は小瓢箪間歩付近から斜面方向に向かって撮影した画像である。また図 14(b)は小瓢箪間歩坑口から約80m先の露頭掘跡である。基準球を48個ランダムに配置して12カ所測定した。それらを重ね合わせた結果を図 15 に示す。図 16 に地面抽出処理後の斜面全体の点群データを示す。図中の赤丸は測定箇所を示している。図 17 は面データに底面および側面データを追加した立体データである。木や倒木等が除去され採掘時の斜面形状が再現されている。図 18 に3Dプリンタで製作した模型を示す。

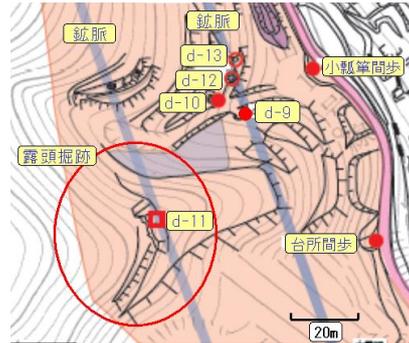


図 13 小瓢箪間歩付近測量図



(a) 小瓢箪間歩坑口付近



(b) 露頭掘跡

図 14 測定範囲内代表的画像

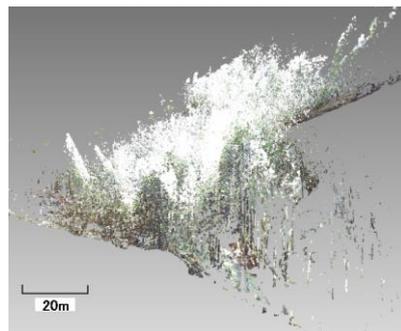


図 15 重ね合わせた点群データ

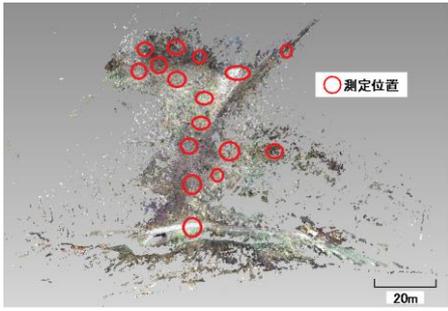


図 16 地面抽出処理後点群データ

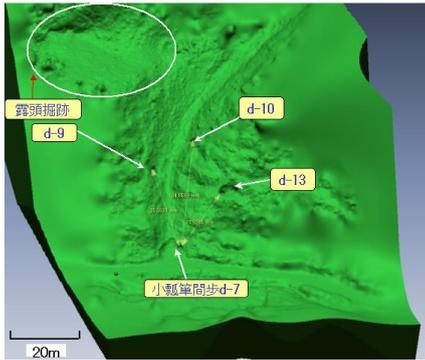


図 17 立体データ

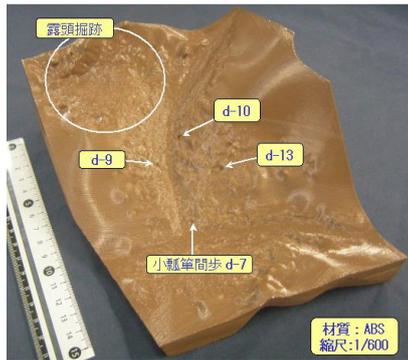


図 18 3Dプリンタで製作した模型

この結果から露頭掘跡の採掘体積を計算すると小瓢箪間歩上部は 412m^3 となった。またこの値から銀の産出量を推定すると約 498kg となった。

(2) 坑道内測定

次に図 4 に示した 3 次元レーザスキャナを搭載した遠隔操作型ロボットを用いて小瓢箪間歩と d-9 坑道を測定した。図 19、図 20 に測定結果および断面形状を示す。断面形状は、概ね矩形型であった。上述した露頭掘跡と同様に採掘体積を計算すると小瓢箪間は 39.3m^3 と d-9 坑道は 18.5m^3 となった。いずれの坑道も採掘傾斜はほぼ 0deg であった。

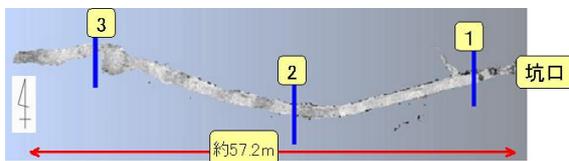


図 19 小瓢箪間歩 測定結果 (上面図)

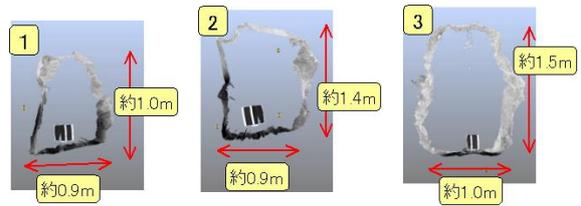


図 20 小瓢箪間歩 断面形状

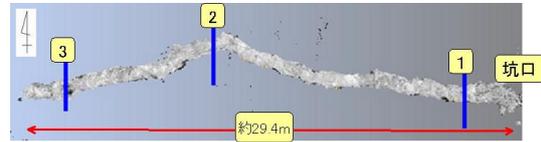


図 21 d-9 坑道 測定結果 (上面図)

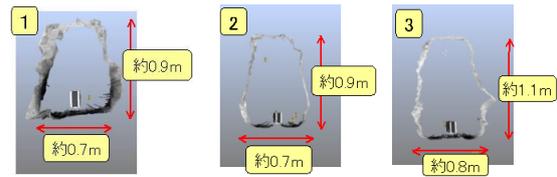


図 22 d-9 坑道 断面形状

(3) まとめ

本研究では採掘状況を解明し各種鉱山の価値を定量的に再評価するため、3次元レーザスキャナを用いて坑道周辺の斜面および本測定機を搭載した遠隔操作型ロボットを開発して坑道内を測定した。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。上記の手法で兵庫県多田金銅山、生野銀山、山梨県湯之奥金山、新潟県佐渡金銀山、山口県長登銅山、島根県石見銀山、久喜鉱山等の調査を行った。この結果から、図 23 に示す様に鉱山坑道の定量データと採掘年代に相互関係があることが示唆された。具体的には坑道の断面形状が、時代によって大まかに 3 つに分類できることがわかった。中世後期は $0.5 \sim 0.8\text{[m]}$ 、高さ $0.5 \sim 2\text{[m]}$ の三角型、近世前期は幅 $0.5 \sim 0.8\text{[m]}$ 、高さ約 1[m] のアーチ型、近世中期以降は幅約 0.6[m] 、高さ約 1[m] の矩形型である。また採掘傾斜角が時代とともに下向き傾斜から水平に近くなることも示唆された。

本相関関係を用いることにより古文書等資料の乏しい坑道の採掘年代を推論することが可能となった。



図 23 坑道定量データと採掘年代の相関

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

①久間英樹、幸田憲明、森内敦史、福岡久雄、明治期の鉱山煙害対策のために製作された煙道の定量解析、技術史教育学会史、査読有、Vol.17、No.2、pp.8-13、2016.3

②久間英樹、森内敦史、福岡久雄、3次元レーザスキャナを用いた多田銀銅山小瓢箪間歩付近の定量解析、技術史教育学会史、査読有、Vol.16、No.2、pp.19-24、2015.3

③久間英樹、福岡久雄、廣瀬誠、佐渡金銀山南沢疎水坑内「のみ角」の定量解析、技術史教育学会史、Vol.15、No.2、pp.12-17、2014.3

〔学会発表〕(計20件)

①久間英樹、井澤英二、福岡久雄、森内敦史、ハンドヘルド蛍光X線分析装置と3次元レーザスキャナを用いた煙道の定量解析、平成27年度資源・素材学会秋季大会、2015.9

②久間英樹、長澤潔、福岡久雄、3次元レーザスキャナと3Dプリンタを用いて解き明かす鉱山開発の歴史、2014年度日本技術史教育学会全国大会、pp.37-39、2014.10

③Hideki Kuma, Hisao Fukuoka, Makoto Hirose, Quantitative Analysis on Mining Tunnels using Remotely Controlled Robots, BUMA VIII (The Beginnings of the Use of Metals and Alloys) ,Ste.13, 2013

〔図書〕(計2件)

①久間英樹、中里和人、野口寛人、素掘りのトンネル マブ・ニ五穴 (INAX ライブミュージアムブック)、LIXIL 出版、2015.10

②荻原三雄、井澤英二、久間英樹、日本の金銀山遺跡、高志書院、2013.12

〔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