

人と協調動作する石見銀山遺跡調査ロボット用マニピュレータに関する研究

Study on the manipulator for Iwami-Ginzan exploration robot cooperating with human operator

1081010 (登録番号)

研究者代表 松江工業高等専門学校 電子制御工学科 教授 久間英樹
共同研究者 松江工業高等専門学校 情報工学科 教授 福岡久雄

[研究の目的]

世界遺産登録された石見銀山では、現在 600 以上の間歩と呼ばれる坑道跡が確認されている。多くの間歩は非常に狭く落石などの危険から立入禁止となっており未解明のままである。

従来の間歩調査は、各種の古文書等、歴史的資料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。本研究では、ロボットに取り付けた各種センサを用いて、坑道内部を直接探査することによって定量的に間歩内部を計測し坑道採掘方法を解明していくことを目的としている。

[研究の内容、成果]

本報告では、現場で組替え可能な探査ロボットの接合部分に着目し開発したロボットを示す。また、ロボットの操作性を向上させ確実かつ的確に作業を行うために、マスタースレーブ方式のロボットマニピュレータの開発も行ったのでその有用性を示す。

1. 探査システム

探査システムのモデルを図1に示す。ロボット上部にカメラを取り付け、坑道内の様子を記録する。またレーザ測域センサ（北陽電気製 URG-04L）を取り付けることで、坑道内部形状の非接触計測を行うことができる構造とした。間歩内部の計測方法は、レーザ測域センサとパソコンをつなぐケーブルに $L=0.25\text{m}$ 毎に印をつけ、ロボットを 0.25m 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2次元の坑道内断面形状デ

ータを取得した。探査終了後1データ毎に数値化を行い、パソコン上で走行距離 L を考慮して3次元散布図化した。

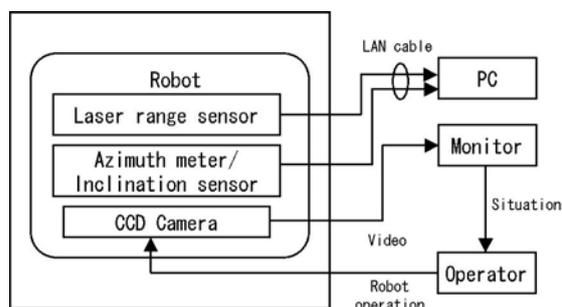


図1 探査システム

2. 探査ロボット

2.1 車輪モジュール連結型

図2に1号間歩を探査するために開発した6つの車輪をもつロボットを示す。1号間歩は、16世紀初頭に開発された入口の形状が三角形をしていることが特徴的である。

ロボットの上部にはハイビジョン対応のビデオカメラ (SONY 製 HDR-HC7) を取付け、カメラを遠隔操作で上下左右可動させることにより、間歩内の様子を詳細に記録する。遠隔操作は有線によって行い、記録画像はケーブルを通じて操縦者へと送られる。

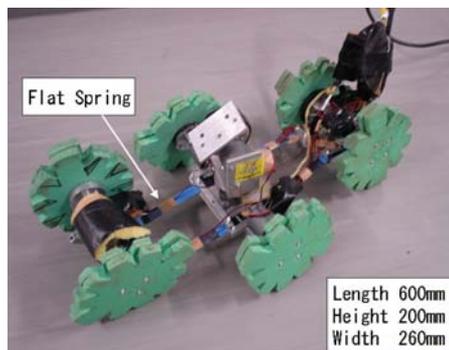


図2 車輪モジュール連結型

現場で組み替え可能とするため各モジュール間に駆動系を設置する方式ではなく、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。車輪の形状を検討するため、1号間歩を想定した模型を製作し、車輪の性能試験を行った。性能試験を繰り返した結果、図2に示す形を決定した。車輪の突起が地面の凹凸を捉えることにより、高い走破性を持たせることができる。また、車輪を楕円状にすることにより岩の隙間にはまることなく走行することが可能となった。車輪の材質は加工が簡単でクッション材にもなるEVA（エチレン酢酸ビニル）ポリウレタン加工を使用した。

2.2 クローラモジュール連結型

図3に82号間歩を探索するために開発したクローラ型ロボットを示す。82号間歩は約350年前に開始された入口の形状が四角形をしていることが特徴的である。



図3 クローラ型

82号間歩は比較的平らであることから、クローラを用いたロボットを基本とした。走行試験において、クローラをロボットの側面に配置するのみでは間歩内に存在する岩や地面の凹凸にロボット腹部が接触し、走行が困難となることが分かった。この問題を解決するために、ロボットをクローラで包みこむように配置することで、腹部が接触する問題を回避した。しかしながら、クローラが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転倒する問題が発生した。そこで、前後に横転防止ガイドとなるクローラを取り付けた。従来のレスキュー型ロボットに広く採用されている左右にフリッパを搭載したクローラ型では、ロボットの幅が広くなり、実際の間歩探索で使用するには大きすぎる。また、遠隔操作する際、各フリッパがどのような位置にあるか検出しにくい。そのため、左右のクローラに連動する副クローラを前後に配置したシンプルな構造とした。車輪型ロボットと同じくロボット上部にハイビジョン対応のビデオカメラを取り付け、可動させることにより、間歩内の様子を詳細に記録する。

2.3 マニピュレータ搭載型

遠隔操作によるロボットの操作性を向上させるため、図4に示すようなマスタースレーブ方式のマニピュレータを搭載したクローラ型のロボットを製作した。マスター側とスレーブ側は同一の構造となっており、4つの小型サーボモータ（Futaba S3003 動作スピード 0.2s/60° トルク 4.1kg・cm）を組み合わせた4自由度の構造となっている。ロボットに搭載されたスレーブ側の先端にはCCDカメラ（マザーツール製 41万画素）が搭載されており操縦者はマスターを握ってスレーブ先端に取り付けられたカメラから送られてくるデータを見ながら操作を行った。駆動部はどのような地面でもある程度安定して走行可能なクローラ型とした。

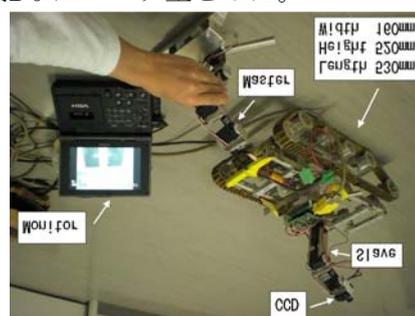


図4 マニピュレータ搭載型

3. 探査結果

3. 1 1号間歩

記録した映像データ及びロボットとコントロールボックスを接続したケーブル線の長さや探査時間をもとに図5に示す1号間歩内部の構造を推測した。

ロボットが撮影した映像から、1号間歩の内部形状は入口の三角形が続き、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分かった。入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奥に進んだ地点に垂直に下に伸びる立坑を発見し、立坑を挟んだ向かい側にさらに間歩が続いていることを確認した。

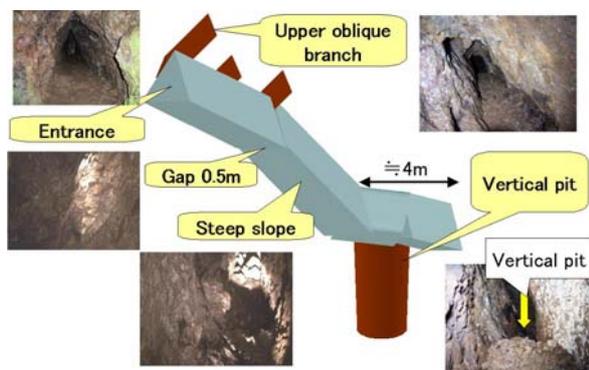


図5 1号間歩の内部形状推定図

3. 1 82号間歩

図3に示すクローラ型ロボットにより探査・記録した。その映像データ及びロボットとコントロールボックスを接続したケーブル線の長さや探査時間をもとに図6に示す82号間歩内部の構造を推測した。

ロボットが記録した映像から、82号間歩の内部形状は入口の四角い形状が続いていることが分かった。82号間歩は1号間歩と異なり、壁面や天井の岩肌が綺麗に整えられていることが映

像から分かった。また、奥に進むにつれ、間歩の内部で坑道がいくつか分岐していることも分かった。分岐した先は崩落している個所もあった。ロボットが進める方へ探査を進めていくと、入口から約25mで行き止まりになっていた。

また、地面が比較的平坦であったため図4のマスタースレーブ方式のロボットを用いて探査を行った。その結果カメラの操作性が向上したことによって種々のアングルから間歩画像を取得することができた。しかし車高が500mmと高くなったため横転の危険性が増した。更に狭小の間歩での探査に不向きであることなどの問題点が明確になった。

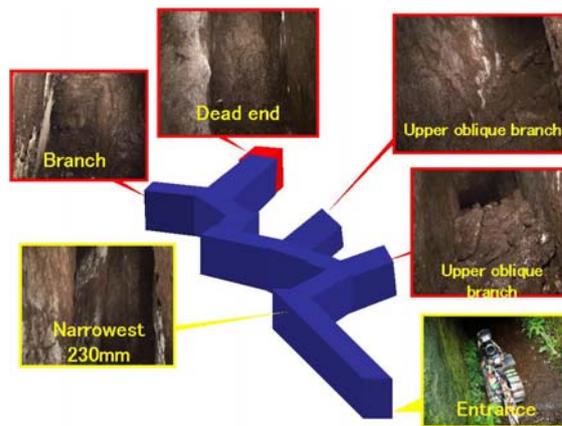


図6 82号間歩の内部形状推定値

4. 考察

ロボット探査の結果得られた画像データおよびレーザ測域センサデータに基づいて得られた、間歩内部の形状及び構造に関する新たな知見について述べる。

1号間歩は入口から立坑まで分岐がなく、地面に潜るように下に向かって掘られている一本道だということが分かった。また、入口や内部の形状が三角の形をしていることから、戦国時代に採掘されていたと思われる。このことは、考古学的調査結果とも整合する。

82号間歩は複数に分岐していることが分かった。1号間歩と違い内部は比較的平坦な間歩であった。入口や内部の形状が矩形になっていることから、江戸時代に採掘が行われていたと思われる。

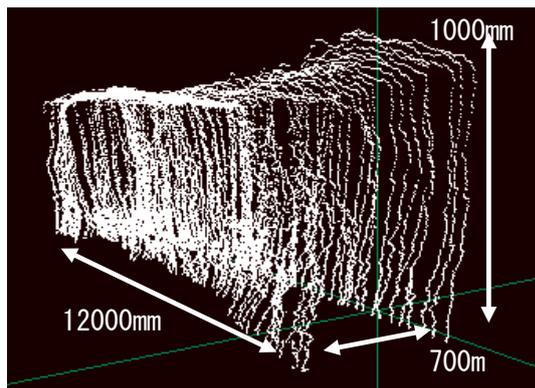


図7 82号間歩の3次元散布図

分岐先は直後に崩落しており探査の続行は不可能だった。しかし、探査を行った区域だけでも壁面にノミの痕跡が確認できたことから、手作業で掘られたことが考えられる。このことから、当時の採掘技術の高さが伺える。また、江戸時代に82号間歩付近から大量の銀が採掘されたと言われているが、どの文献にも正確な銀の採掘量が記されておらず、いまだ不明である。銀の採掘量は採掘した岩石の量に関連するため、図7に示す82号間歩のレーザ測定データから採掘された岩石の量の計算をしたところ、測定した12[m]間で体積は6.08m³で、これより約14.6[kg]の岩石が採掘されたことが推定される。このように、レーザ測域センサを用いて形状計測することで間歩内部の体積が推定可能となる。

5. まとめ

形状が異なる2つの間歩をロボットを用いて探査した結果、以下のような成果を得た。

(1)ロボットを用いることにより人手での調査が困難な間歩内部を調査することに成功した。

(2)記録した映像から間歩の構造、採掘時期および採掘方法を割り出すことができた。

(3)レーザ測域センサを用いることにより、間歩の形状を正確に計測できた。

(4)マスタースレーブ型のマニピュレータ搭載クローラ型ロボットを開発した。操作性は格段に向上した。しかしロボットの車高が高くなるため横転の危険性が増した。また狭小間歩での探査に不向きであることがわかった。

[今後の研究の方向、課題]

今後は、間歩探査に最適な走行性と操作性を両立したマスタースレーブ型マニピュレータ搭載ロボットの更なる改良を行う。更に、本間歩探査システムの有用性を他の金銀鉱山での調査で実証していく。

[成果の発表、論文等]

論文発表

- 1) 久間英樹, 皆尾登志美, 福岡久雄, 内村和弘, 箕田充志, 石原恵利子: “世界遺産「石見銀山」探査ロボットの開発と調査”, 日本ロボット学会, Vol. 26, No. 6, (2008)
- 2) 久間英樹, 皆尾登志美, 高橋勇作, 福岡久雄, 小松美鈴: “鉱山坑道形状計測システム～坑道採掘方法に関する検討～”, 日本鉱業史研究, Vol. 57, (2009)

学会発表

- 1) 久間英樹, 皆尾登志美, 福岡久雄, 齊籐陽平: “ロボットと用いた石見銀山間歩の形状計測”, 平成20年度資源・素材学会秋季大会, pp. 7-8, (2008)
- 2) 久間英樹, 皆尾登志美, 福岡久雄, 内村和弘, 齊籐陽平: “ロボットと用いた世界遺産「石見銀山」間歩形状計測”, 第26回日本ロボット学会学術講演会, pp. 146, (2008)