

AIが建設機械を遠隔地から現場の カメラ画像を見て遠隔操縦

大津良司

建設機械の更なる自動化が求められている。現状の自動化技術では時々刻々と変化する現場環境に対応できない。

本稿では、現場設置のカメラで現場を撮像し、その画像をAIが見て建設機械や周囲状況を把握して建設機械を遠隔操縦するAIを開発したのでそのシステムについて報告する。このAIは建設機械にコンピュータや高度なセンサを搭載する必要は無く、AIが無人化施工オペレータのように画像を見て既存の建設機械を操縦する汎用性と低コストを兼ね備えた技術である。屋外でもトンネル内のような閉空間でも使える。また、日本全国各地でパソコン画面から現場管理や、マウスで現場画面上に走行ルートを設定することができる。そのため、様々な人に就業機会を提供できる。

キーワード：自動化、AI、遠隔操縦、三次元位置認識、画像認識、5G、SDGs、コロナ対策

1. はじめに

建設業就業者の高齢化と若年層入職者減少による労働人口減少が避けられない。また、建設業は製造業と比べた生産性の低さも課題である。

そのため、機械化や自動化を進めることは建設業で広く求められている。ロボットやAIで作業を代替することにより、人が行う作業量を減らし労働人口減少に対応するばかりでなく、完全自動化できない作業についても、機械が行う作業を人が遠隔地から支援することで、安全で快適な作業環境で離職の防止と新規採用促進を図ることができる。

しかしながら、建設工事は複雑で作業進捗と共に作業内容が変化するため作業者の技術力と経験に基づいた判断と機械操作のスキルが必要な高度な作業であり、自動車自動運転や自律走行ロボットにならった建設機械にコンピュータやセンサを搭載してAIが制御して自律的に動かそうとする現在の技術力では限られた作業以外の自動化が進んでいない状況である。

筆者らは長年無人化施工・情報化施工に携わるとともに高速道路上で走行する自動車の位置及び速度を300m手前からステレオカメラを使い検出するAIカメラセンサや物体認識及び自律走行ロボットの開発を行ってきた。

これら技術を使い、無人化施工で使われている現場の俯瞰カメラ画像をAIが見て、建設機械を物体認識

と三次元位置認識をするとともに周囲環境を把握して遠隔からAIが建設機械を遠隔地からオペレータに代わりラジコン操縦する技術を開発した。

また、人が遠隔地からパソコン画面に表示されている現場映像にマウスでルートをクリックしていくだけで建設機械の走行ルートを設定できるようになった。

2. 走行の自動化の課題

(1) 建設工事環境の課題

本稿では建設工事の自動化の中で走行の自動化について述べていく。

建設機械の自動化は長年研究開発が進められているが、製造業のロボット化や自動化と比べ現状できる作業が限定的である。

製造業において自動化が進んでいる理由は次の3点にある。①製造するものは大量生産であり、同じものを繰り返し作る。そのためロボットが行う作業も同じ動作の繰り返しである。②ロボットは固定され部品や半製品がロボットの前に運ばれている。③ロボットが作業しやすい設計をしている。

一方、建設工事は①現場毎に作業環境が異なり行う作業に経験と判断が必要となる ②同じような作業であっても状況に変化がある ③機械は作業場所に自ら移動する必要がある ④作業場所が移動する ⑤製造業で使用される産業用ロボットは基礎に固定されてい

るため、回転動作やアームを伸ばすときに0点が決まっている。そのため、0点からどれだけ回転するか、アームを伸ばすかなどが明確である。また、あらかじめ伸ばしたアームの先に対象物が運ばれて来るためロボットと対象物の距離と位置が一定である。一方、建設工事では機械が移動するため固定の0点を作れない。そのため、例えばバックホウでの掘削作業であれば、掘削場所とバックホウとの三次元での位置関係をバックホウが推定する必要がある。さらに、旋回やバケットの移動も三次元で制御する必要がある。それも、現場が不整地であり、凹凸や傾きがあることが多いため走行制御は難しい。

(2) 自律走行技術の技術と課題

(a) 実用化されている自動走行技術の利用検討

(1) 節で述べたように建設機械の走行を自動化するためには様々な課題がある。そこで、既に実用化されている車両の自動走行技術の利用を検討した。

車両の自動走行は自動車の自動運転技術及び自律走行ロボット技術がある。これら技術のいずれも車両が移動する、もしくは作業をするためには自らの現在の位置と周囲の状況を知る必要がある。なお、自律走行ロボットとは、ロボット自体にコンピュータやセンサを搭載し周囲を計測して、相対的な自己位置推定と周囲環境の把握を行った上で、ロボット自らが判断をして走行や作業を行うロボットである。工場や倉庫の搬送に使われる床にラインやマークを張り付けそれをトレースしながら走る軌道走行ロボットは自律走行ロボットとは呼ばない。

自己位置を推定する方法には、外部からの位置情報データを使う方法と、作業車両に搭載したセンサにより車両自らが周囲の状況を計測し、周囲情報から自己位置を推定する方法がある。

(b) 外部情報を使った自己位置推定方法

① GNSS システムについて

GPS (Global Positioning System) に代表されるGNSS¹⁾ (Global Navigation Satellite System 全球測位衛星システム) は既に建設機械の自己位置の計測に幅広く利用されている。

自動運転車両の場合はGNSSからの位置情報を受信し、事前に作成された細密な三次元地図データと照合することで自己位置を推定することができる。これに路白線認識と周囲車両の位置認識を行うセンサを組み合わせることで自動車やロボットは自動運転・走行ができる。加えて、補正やGNSSデータが取得できないトンネル内走行のため車輪回転数から走行距離を

導いている。

② GNSS の課題

今やスマートフォンにも搭載され汎用的な技術になっているGNSSにも建設機械の自動化に使用する上で課題がある。

まず、単独測定では衛星の位置誤差、対流圏や電離層通過による伝搬遅延、マルチパスなどでGPSの場合には10 m程度の誤差が生じる。

また、衛星が4つ以上測定できない場所では自己位置を特定できない。そのため、トンネル内や建物内の他、山間部、土工で掘削が進むなど上空が45度程度開放されていなければ自己位置が推定できない、もしくは大きな誤差が生じる。建物内などで使えるローカルGPSもあるが移動体の位置推定に使える高い位置精度が出せない。

そのため、車両の自己位置推定には搭載したGNSS受信機単独では生じる誤差を少なくし測位精度を高める追加のシステムが必要となる。その1つが相対測位である。これは基準局を使う方法で手法は複数ある。

もう1つが、車両に慣性測定装置を搭載し三次元姿勢を測定することで位置精度を高める方法である。

(c) 車両搭載センサを使った自己位置推定方法

① SLAM について

SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) は自動運転や自律走行ロボットで自己位置推定に広く使われている技術である。

SLAMは、Simultaneous (同時に) Localization (自己位置推定) and Mapping (地図作成) とあるように、自動車やロボットに搭載したセンサを使い車両に搭載したセンサから測定した周囲の建物、屋内であれば壁や柱の形状を記録する。車両が走行しながら周囲を測定することで徐々に地図ができあがる。この方式は自らが地図を作成していくため、事前に作成した地図が無くても自動車などは自ら測定し作成した地図によって周囲との相対的な位置関係を認識して走行することができる。この時に次の代表的なセンサが用いられている。

1) LiDAR (レーザスキャナ) SLAM

a) 2次元スキャナ レーザを回転体に載せ左右に動かし水平に照射して平面の地図を作成するセンサ平面しか測定できないため照射した対象物の上下がどのような形状になっているか測定できない。

b) 3次元スキャナ 2次元スキャナの欠点を改良した上下左右にレーザを照射することで三次元の面で測定することができる。

c) 計測距離は数mのものから100m程度の装置が

ある。そのため広い場所では使えないことも多い。また、光を使うため、屋外では太陽光で減衰するため測定できる距離は短くなる。また、雨、霧、雪にレーザー光が吸収される、黒い物体には光が吸収され反射しない。などの使用上の制限がある。

さらに、レーザーの反射をセンシングする点群データであり、このスキャナだけでは物体認識はできず、何らかのものが自己から何 m にあるという認識しかできない。

強いレーザー光は人の目に侵襲性があるため取り扱いには注意が必要である。

d) 測定は周囲 120 度程度から 360 度まで測定できる装置があり、一度に周囲広い範囲の測定が一度に行える。

2) カメラを使った Visual SLAM

単眼カメラもしくは複数のカメラを使い、走行前方もしくは周囲を撮像し、そのデータをもとに周囲の物体の特徴点を検出する。特徴点の抽出だけでそれが何であるかの物体認識はできない。1つのカメラを使った装置の場合、画角が狭く見えている範囲が狭いため、進行方向だけしか把握できない。

3) TOF (Time Of Flight) センサ

赤外線を照射し、物体に当たり反射してセンサに戻って来るまでの時間を測り物体までの距離を測定する距離センサである。LiDAR がレーザー光を照射させるが、TOF センサは赤外線を使い照射し反射でその光が戻ってくる時間を測定する。測定可能距離は数 m と短い。

本センサも物体は認識できない。

4) SLAM の課題

センサでの測定では走行させたいルートを決めることができない。SLAM を使う場合、最初に人がその移動体搭乗するか手動で走行させたい実際のルートを走らせながら 3) 項のセンサを使い周囲環境を測定し地図を作っていく必要がある。2 度目以降移動体はセンサを使い測定して最初に作った地図と今作った地図の周囲状況を合致させて今どこにいるのか自己位置を確定する。その後、移動しながら測定を続け新たな地図を追加させ時々刻々と最初の地図の相似性を確認し、車輪のスリップなど走行によって生じたズレを絶えず補正しながら進んで行く。

SLAM は例えば柱やビルの角などの特徴点を照合しているため

a) 連続して壁が続くような特徴が無い場所では特徴点を見つけられず走行できない

b) 工事が進捗し周囲状況が変化すると最初の作っ

た地図と照合できず走行できない

c) 屋内外の広いエリアでセンサが照射したレーザーや赤外線が反射して戻ってこれずセンシングできないため走行できない

d) 2 度目以降の走行時に不整地でセンシングした場所がずれたりや移動体が振動してしまうと測定した結果が最初の地図と異なる地図を作ってしまう最初に測定した特徴点を見つけられない場合は走行できない

②カメラ

カメラは1つのカメラ(単眼カメラ)では撮像した映像を画像処理すると平面でしか認識できない。そのため、物体認識としては使用できるが、その物体までの距離は測定できないため距離センサとしては使えない。

そこで、ステレオカメラを使い立体視することで対象物までの距離測定を行っている。

自動運転で使われるステレオカメラシステムの多くは前方数十 m 以内の車両の有無の認識、前方車両との距離認識、道路白線認識を行っている。このシステムでは道路の凹凸や傾斜は認識できない。

また、単眼カメラもステレオカメラも画角が 45 度から 90 度程度と人が両目で見る視野の 120 度程度に比べ狭く、進行方向の狭い範囲だけしか測定できない。そのため、周囲の状況が十分把握できず最適なルートの検索や走行時の周囲への安全確認などに課題がある。

周囲を広く一度に見るには魚眼レンズのように 360 度撮像できるものもあるが、ひずみが大きく中心付近では物体は大きく見えていても、同じ大きさの物体は円周寄りでは小さく歪んで見える。そのため、画面全体の距離認識や物体認識をそのままの画像ではできず、車両に搭載して実用的に走行に使うのは難しい。

3. 建設機械のラジコン操縦 AI の開発

(1) 建設機械の自律化開発からの発想の転換

2 章で評価をした実用化されている自動運転システムや自律走行システムの技術は建設作業で使うには課題があることが分かった。まとめると①事前に作成した地図が必要である ② GNSS は 4 つ以上の衛星からの電波が受信できる場所であること ③ GNSS を使う場合は位置精度を上げる他のシステムが必要 ④ SLAM は遮るものが無い開放空間では使えない ⑤ 時々刻々と状況が変わる場所では SLAM は使えない ⑥ カメラは画面が狭く測定できる範囲が狭く走行性や安全性に課題がある ⑦ 建設機械にコンピュータやセ

ンサを搭載するのは振動や熱の発生から故障の危険性が高い ⑧高額の自動化装置を各建設機械に搭載することはコストアップになってしまう など多くの課題があり、建設現場で高度な自動化作業を行うには新たなシステムが必要と判明した。

そこで、筆者らは建設機械に様々な装置を付け、建設機械自体が判断してオペレータが搭乗操縦できると同様の精度で自律的に走行できるようにする開発をしなければならないという既成概念を捨て、無人化施工で利用されているカメラ画像をオペレータが見て建設機械を操縦するのと同じように AI がカメラ画像を見て建設機械をラジコン操縦するシステムを開発した。

(2) 自動化できる建設機械

建設機械はラジコン操縦対応建設機械もしくは既存建設機械に遠隔操作用に油圧制御装置を追加する。これまでもバックホウ、ミニショベル、ダンプトラック、クローラダンプ、ブルドーザー、振動ローラー他がラジコン操縦建設機械に改造されているため、新規の開発は必要なく油圧制御装置と無線操縦装置を追加するだけである。

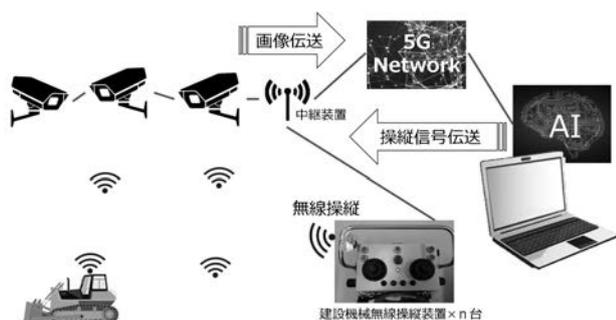
(3) システム構成

図一に示すように、建設機械の操縦はパソコンで行う。パソコンには「ラジコン建設機械操縦 AI ソフトウェア」がインストールされている。また、現場に設置されたカメラから伝送された画像を同じパソコンに USB 接続で取り込む。

画像を撮像するカメラは IP カメラやネット会議で使う web カメラでよく、特別な専用カメラを準備する必要は無い。つまり、一般的な単眼カメラだけを準備するだけで良い。

さらに、パソコンは建設機械の無線操縦装置も接続する。

これによって、画像の入力、入力された画像の認識、



図一 AI による遠隔地からの建設機械操縦システム構成図

制御の判断、建設機械の操縦用データ出力が行えるようになる。

(4) 作業環境変革による若年層就業者増加並びに SDGs 及び COVID-19 対応

AI 搭載パソコンは、従来の無人化施工同様に操縦用の電波が届く範囲の離れた場所に設置することもできるが。中継装置を使い遠隔地に設置することもできる。5G を使えば画像伝送や制御信号の遅延を考慮する必要が無く遠隔地からリモート制御ができるようになる。

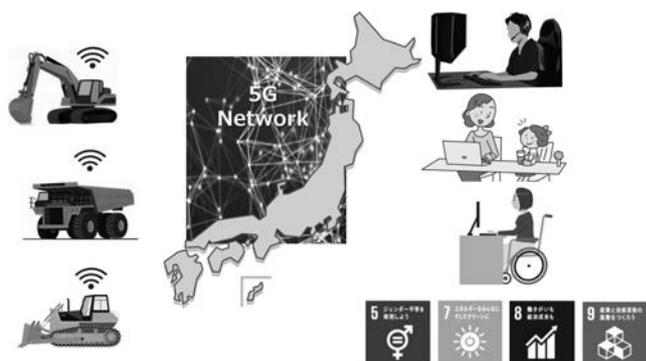
建設業は就業者の高齢化が著しい上、若年層の就業者が少なく逆ピラミッド型の年齢別就業者数になっている。

図一に示すように、遠隔地から安全で快適な環境で AI を使いながら建設機械を操縦できるようになることは先端的な業務になり若年層に注目させるようになる。また、離れた場所から作業ができることは全国どこからでも作業をすることができ、地方の雇用創出、女性の進出、体が不自由な人々の雇用創出と建設業の発展を同時に叶えることができる。

また、建設機械に消費電力が大きい高性能なコンピュータやセンサを搭載する必要がなくなることによって建設機械の発電によるエンジン負荷が減り消費する燃料も減らすことができる。これは、SDGs の「5. ジェンダー平等を実現しよう」「7. エネルギーをみんなにそしてクリーンに」「8. はたらくがいても経済成長も」及び「9. 産業と技術革新の基盤を作ろう」を実現するものである。さらに、リモート作業で密にならず職場への出勤も減少させるため COVID-19 の感染拡大対策にもなる。

(5) AI の物体認識および三次元位置認識

AI は一般的な単眼カメラの画像から物体認識と建設機械など体操物の三次元位置認識を行うことができ



図二 快適な遠隔地から様々な人が作業を行える

る。

単眼カメラから取得した画像は二次元平面であり奥行きは認識できない。筆者らは次の手法により単眼カメラ画像から三次元位置認識を認識できるアルゴリズムを開発した。

①建設機械に取り付けたマーカの読み取り

写真—1に示すように、4方向がわかるマーカによって、AIはマーカを読み取った時に建設機械の前後左右を理解する。また、画像の中のマーカの大きさによってカメラからの相対位置を認識する。

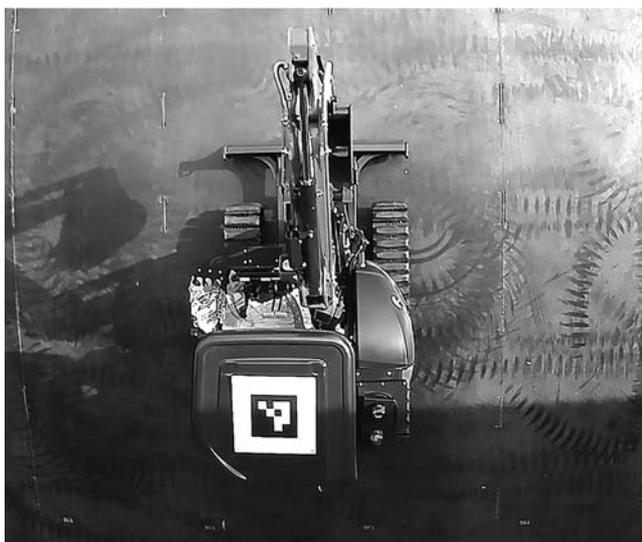
この時、マーカの傾きによりどの方向にどのように傾いているのかもAIは理解をしている。

なお、マーカを用いず建設機械の形状の特徴から建設機械の位置と傾きを三次元認識するアルゴリズムもある。

カメラを使ったマーカもしくは特徴点検出により、AIは空間上の建設機械の三次元位置認識をすることで、広い屋外環境においても施工中の建築の屋内環境においても建設機械や周囲状況を把握することができる。

つまり、GNSSにおける付帯システムが不要になり、かつ衛星電波が受信できない環境でも建設機械の操縦を行うことができる。

SLAMを使う自律走行では周囲環境が変化するとマップのマッピングができず自律走行ができなくなるが、本システムは事前の周囲環境の測定は不要であるとともに、周囲を測定しながら走行させる必要は無いため環境の変化に走行は左右させないため、時々刻々と変化する環境においても建設機械を自動で走行させることができる。



写真—1 マーカによる位置及び方向の認識

(6) 走行ルートの設定

①既知の物体の自動ルート設定と搬送

あらかじめ設定した物体の場合、AIはその物体の前後左右を認識して、搬送ロボットがどの方向から対象物に潜り込み搬送するか判断する。次に対象物を把持して指定場所に最適ルートで搬送する。対象物が複数ある場合は搬送作業を繰り返す。

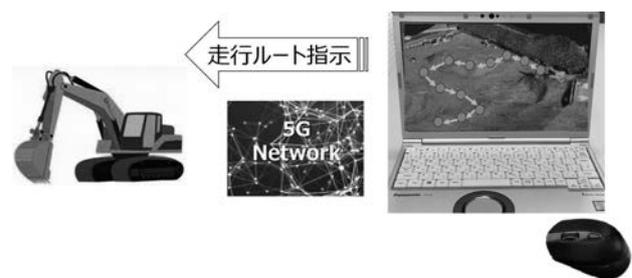
その時、どの対象物から搬送を開始しなければ後になって搬送できないものが出現するかAIは判断をして、搬送する順序を決め搬送をする。

②人による遠隔からの移動ルート設定

既に述べたようにSLAMを使う自律走行では事前に車両を手動操作して実際の現場でルートを指示していく。

一方、図—3に示すように本システムでは、パソコンの画面に表示された現場のカメラ画像にマウスを使いルートを設定することができる。そのため、遠隔地から数秒でルートが設定できる。

パソコンに映っている画像は二次画像である。斜めから撮影されている画像を人は奥行きがあるように感じるが実際は二次元平面でしかない。その平面上に走行ルートを設定するのは人は奥行きのある画面の手前や奥に位置指定をしたつもりでも実際は画面の前後左右に指定しているだけである。それをAIが三次元位置変換を行い、実際に車両が走行する時は現実の現場の三次元で走行することができる。



図—3 パソコンから建設機械の走行ルートを設定

4. 実証実験

(1) 準備

大和機工(株)(愛知県大府市)と実証実験を行った。建設機械は写真—2に示す日立建機のミニショベルZX30を無線操縦仕様に改造して使った。

ミニショベルの電磁弁工事と制御装置及びラジコン操縦装置は大和機工(株)が準備した。カメラは地上から約10mの高さの工場の庇部分に取り付けた。ラジコン操縦装置とパソコンはRS485で接続した。カメラ

は web 会議用カメラでパソコンとは USB 接続した。

本実験ではミニショベルキャビン屋根にマーカーを取り付け、カメラでマーカーを撮像し、パソコンにインストールした AI が画像認識して、ミニショベルの位置と方法を認識するようにした。

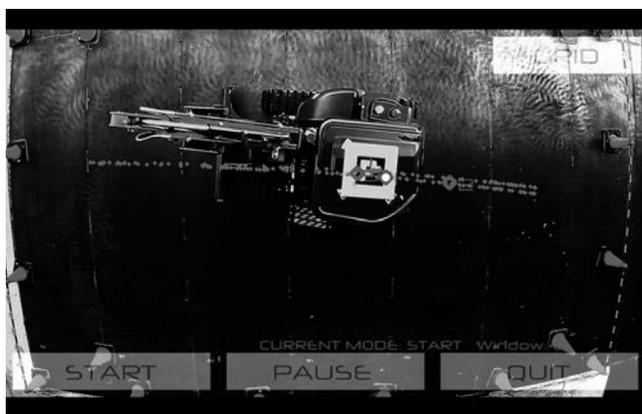
その上で、パソコンからマウスでミニショベルの走行ルートを指示すると、指令がラジコン操縦装置に送られ、ラジコン操縦装置がミニショベルを遠隔操縦するソフトウェアを開発した。

(2) 実験

2020 年 10 月に大和機工常滑工場で実証実験を行った。写真—2 のパソコンの画面を見ながらマウスでルートを設定すると、写真—3 に示すようにミニショベルはほぼ誤差なく指定ルートを走行した。



写真—2 使用した建設機械と操作システム



写真—3 マウスで指定したルートを走行した軌跡

5. 考察

本開発の目的である建設機械の自動走行には課題のある既存自動運転技術や自律走行技術に代わる新たな技術を無人化施工を元に開発をした。

AI が現場でカメラ画像だけで建設機械を制御できるか懸念はあったが、実証実験の結果高い走行精度で制御ができることが分かった。

建設機械にはコンピュータやセンサを搭載していないため、コストメリットの他、精密機器の故障の心配が無く、建設機械を高度なロボット化するのに比べ実用性が高いことも優位性があると考えます。

さらに、5G の普及により、全国どこからでもリモートでかつリアルタイムで作業監視や走行指示ができるため、全国の若年層、女性、障害者などに魅力ある仕事を提供できる。これにより、建設業界として SDGs²⁾ への取り組み推進が行える。

また、リモートワークによる COVID-19 対策になることも挙げられる。

なお、本稿では自動走行について検討を行ってきた。自動作業に関しては別の機会に述べたいと考える。

6. 今後自動走行の開発

作業現場は広くかつ不整地であることも多い。そのため、カメラを使って離れた建設機械を三次元認識する技術と地面の凹凸や傾きを測定する新たな開発を行っている。

また、カメラだけにこだわることなく建設機械に慣性計測装置 (IMU : Inertial Measurement Unit) を取り付け、姿勢測定を行うことで精度と安全性を高めていく。

また、トンネル内など暗い場所、粉塵が多い場所では可視光カメラではマーカーを認識できない。筆者らは経済産業省のプロジェクトで数 cm 先が見えない粉塵が立ち込める閉空間内でロボットを見つけ、その姿勢を認識する技術開発を完成させている³⁾。この技術も使いながら認識精度を高めていく。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) 国土地理院 https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_aboutGNSS.html
- 2) 国土交通省の SDGs の取り組み <https://www.sdg-s.jp/column/tag/%e5%9b%bd%e5%9c%9f%e4%ba%a4%e9%80%9a%e7%9c%81/>
- 3) 経済産業省 石油プラント危険作業代替ロボット組込ソフトウェアに係る開発 経済産業省 11-62 2011 年 9 月

〔筆者紹介〕

大津 良司 (おおつ りょうじ)
知能技術㈱
代表取締役

