

重篤事故に繋がる体育館床の ささくれ傷検出口ロボット

東京理科大学 創域理工学部 機械航空宇宙工学科 教授 ^{たけむら ひろし} 竹村 裕

体育館のフローリングが凶器に！

——体育館のフローリングが剥がれ、球技に興じる利用者に突き刺さる——。想像するだに痛々しい事故が、各地で発生しています（日経アーキテクチャ 2019/05/23号）。消費者庁（事故等原因調査報告書、2017年）によると、体育館などにおける重傷事故は、少なく見積もって年1件程度起きており、過去5年以内にささくれによる損傷事故は、調査した学校施設（1,601校）の内4%、公共体育館施設（641施設）の内2%の割合で発生していると報告されています。ところが、体育館のフローリング床の傷・割れを定期的に確認していると回答した学校施設は全体の70%、プロスポーツ選手も使用するような公共体育館施設に至っては、全体の38%しかなく、危険な状態での施設の貸し出しや運用が日常的に続いています。体育館の管理者や管理・補修などを行っている業者による床フローリング点検方法は、人海戦術かつ目視での点検のみです。そのため、点検結果の品質バラツキ、点検に関わる人数確保困難、膨大な作業時間を要することから営業時間外（深夜や休館日）での作業、記録書の作成後に傷の場所特定が困難、などという課題があり、費用だけでなく時間的なコストも問題になっています。

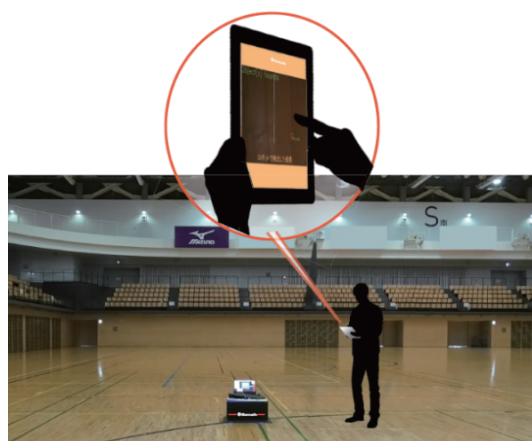
さらに、体育館の状態を定量的に把握していないために、修繕に必要な長期的な計画や予算付けを行っておらず、悲惨な事故は繰り返されているのが現状です。

上記の課題を解決するためには、人為的な点検の品質のバラツキをなくし、AIやロボット技術を活用して人手を必要としない自動での点検システムが最も有用であります【図1】。

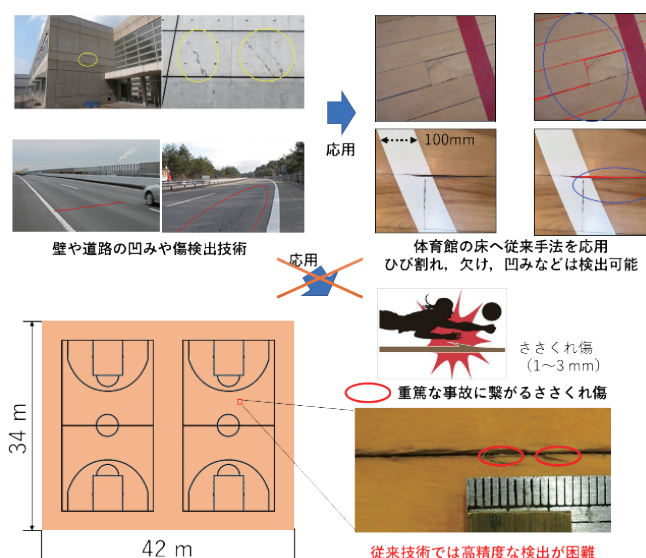
これまでの取り組みと問題点

国内外では道路やトンネル、架橋や壁などの構造物のひび割れや傷の点検などに画像、レーザー、超音波、打診棒など様々なモダリティを用いて検出する手法や装置は数多く提案されており、既にいくつか上市されているものもあります。また、製品工場などでは、微細な傷を画像処理によって高速に検出する品質管理技術も実用化されています。一般的に、同様の既存技術を用いれば、体育館などのフローリング床のひび割れや傷も検出可能と思われます【図2】。

我々も男子ジュニアU21合宿参加中にナショナルトレーニングセンターで起きた事故をきっかけに、体育施設機器器具メーカーであるセノー株式会社と共同研究を開始し、この課題解決にチャレンジしています。



【図1】ロボットによる体育館床検査のイメージ



【図2】従来技術の応用の限界と体育館床のささくれ傷の問題点

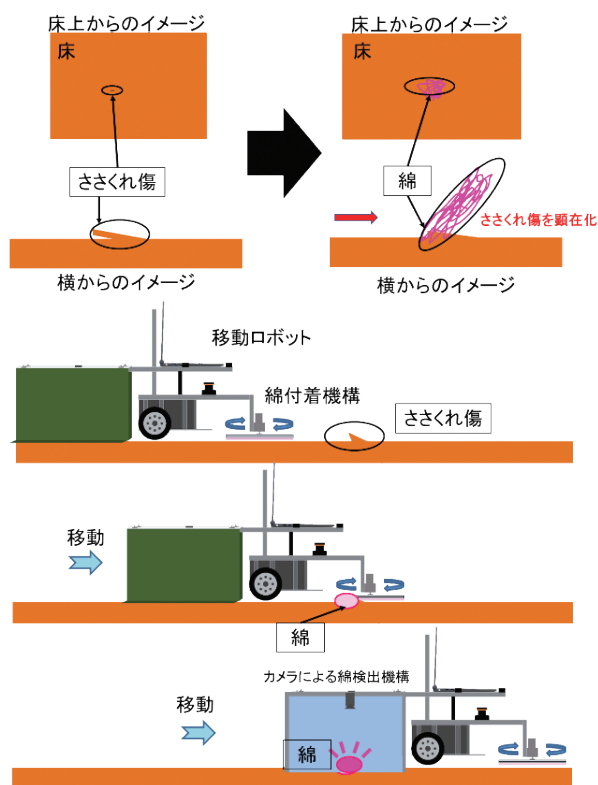


【図3】人海戦術による体育館床検査と綿によるささくれ傷の見える化

研究開発の当初は、既存の画像処理技術を応用して、高解像度カメラを用いて連続的に床を撮影し、傷の検出を試みました。体育館などのフローリング床の傷には、大別して4種類（ひび割れ、凹み、欠け、ささくれ傷）があります。その内、ひび割れ、凹み、欠けは画像処理技術を応用すれば、ある程度検出可能であることは確認されました【図2右上部】。しかしながら、体育館などのフローリング床で特に重篤事故に繋がりがやすいささくれ傷は、サイズも小さく、床面を撮影した画像からでは目視でも検出が困難です。従来の画像処理技術を応用しても検出することが極めて難しく、仮に検出可能であったとしても時間やコストが非常にかかるため、新たな研究開発が必要であることが分かりました【図2下部】。

そこで、原点に立ち返り、体育館管理者や体育館の建設を行うゼネコンなどにも協力を仰ぎ、ヒアリングを実施し、人海戦術による目視での点検方法の再調査を行いました。目視での点検では、検査者の手や床拭きモップにストッキング状の素材をかぶせるなどして、触診により傷への引っ掛かりを手がかりにささくれ傷を探していることが分かりました【図3上部】。この触診によって引っかかるささくれ傷の検出をどうにか自動で行えないかということを検討し、ささくれ傷に綿を付着することにより、ささくれ傷を見える化する技術を思い付きました【図3下部】。

顕微鏡下の細胞の画像や同じようなものが沢山ある場合にマーカーとして何かを付着させ、発光させるなどして目立たせることにより、目で見て分かりやすくする技術（がん細胞などに特異的に付着する抗体による可視化、特定のたんぱく質による蛍光、靴下を工夫して運動会でのわが子を発見し易くするなど）は、一般的には広く普及したアイデアであり、様々なところで応用されています。しかし、1620平方メートル（バスケットコ

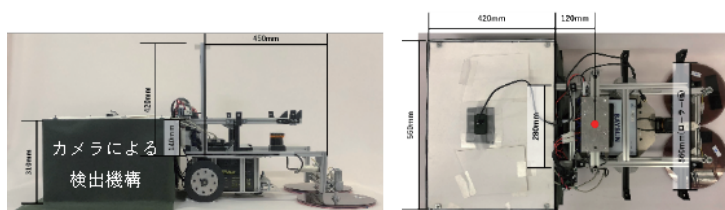


【図4】移動ロボットによる体育館床のささくれ傷自動検出システムの概要

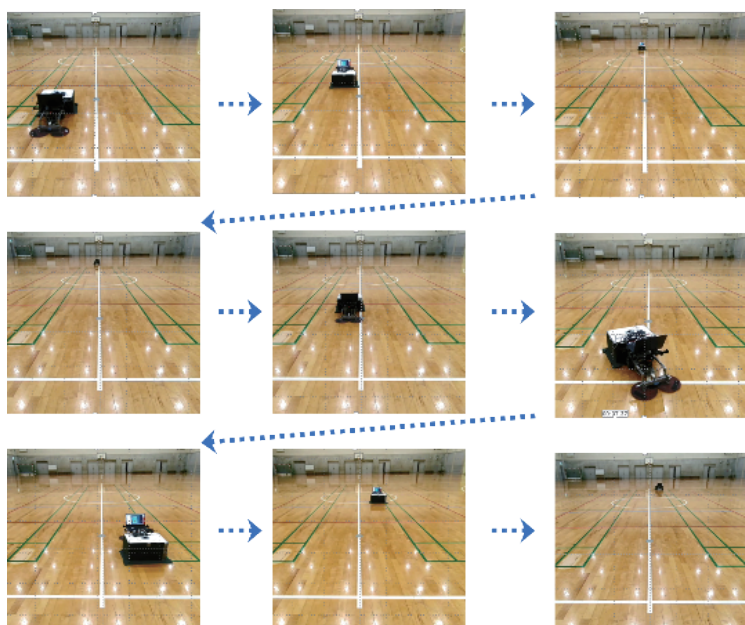
ート4面分)もある体育館アリーナの中から、わずか数ミリ程度の大きさのささくれ傷を見つけることは非常に困難であり、これまでに研究開発事例はなく、とても挑戦的な研究課題です。一見すると、体育館の中をロボットが走行することは簡単だと思われがちですが、屋外の自動運転車やドローンとは違い、GPSなどのグローバル自己位置同定システムが利用できない上に、オフィス内などとは違い、形状が単純であるがゆえに、通路や壁などの特徴量を利用しての自己位置同定をすることも困難です。また、公共施設であるため、自己位置同定に利用するマーカーを床や壁に埋め込むこともできません。さらに厄介な点は、床は施設ごとに素材や塗料が異なり、床には沢山のカラフルなラインが引かれており、その上、天井灯や外部光の反射の影響を受けるため、非常に複雑な画像処理技術が必要になります。

体育館床のささくれ傷自動検出ロボットの開発

上記の問題を解決すべく提案した我々のアイデアを【図4】に示します。まず、ロボットの前方に設置された回転する円盤により、体育館床のささくれ傷に綿を付着させます。綿はあらかじめブラックライトで蛍光するように染色しています。ロボットが自動で移動

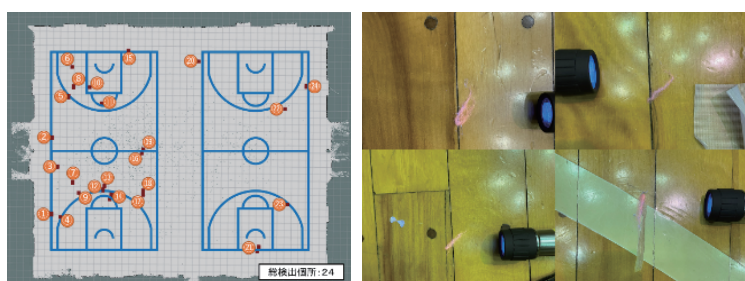


【図5】実際に開発した体育館床のささくれ傷自動検出口ロボットの外観



原理試作機による体育館フローリング床の自動点検の様子

【図6】実際に体育館を検査している様子



【図7】検査結果の表示（左）と検出されたささくれ傷の一例（右）

して、外部光を遮断した検出ボックス内でブラックライトを照射し、体育館床ささくれ傷に付着した蛍光する綿をAI画像処理技術を活用して検出します。事前にロボットが体育館の地図を作成して、ロボット自身が体育館のどの位置にいるか分かっているならば、体育館のどこで傷を発見したかを地図にプロットしていくことができます。後は、体育館の隅々まで隈なく移動すればささくれ傷を検出することができるはずです。（このアイデアはセノー株式会社と共同で特許【特願2020-162590】を出願しています。）

実際に作成したロボットを【図5】に示します。ロボットの移動プラットフォームとして、メガローバー

（ヴァイストン株式会社）を利用し、自己位置同定には基本的にレーザスキャナ（LiDAR）（UTM-30LX、北陽電機株式会社）とモーターの回転数を計測するロータリーエンコーダを利用しました。ソフトウェアは、基本的にROS（Robot Operating System）を利用して独自開発を行っています。後方の検出ボックスの中には、高速カメラBasler ace2（Basler株式会社）とブラックライトLED×4（波長365 nm、日亜化学工業）を設置しています。ロボットの大きさは、1050(L)×560(W)×590(H) mm程度です。

ロボットの動作手順としては、まずロボットの自己位置同定と環境地図作成を同時に行う手法であるSLAM（Simultaneous Localization and Mapping）技術を利用して、体育館の地図（体育館マップ）を作成します。次に、作成した体育館マップからユーザーが検査範囲を設定し、ロボットが自動的に移動経路の計算を行います。家庭内のお掃除ロボットとは違い、体育館床の木目に沿って効率よく全体をスキャンするルートを計算する必要があります。後は、計画した経路に沿って自動で移動（移動速度1.3 m/s）し、床の点検を実施します。自動で移動しながら、体育館床のささくれ傷に蛍光綿を付着させ、その綿を検出ボックス内に設置したカメラを用いて検出します。綿の検出には、色の閾値処理とAI画像処理技術を利用したリアルタイムオブジェクト検出アルゴリズムであるYOLO（You Only Look Once）を利用して高速かつ高精度な検出を行います。現状では上記の処理をノートパソコン1台で処理しています。発見

した画像を保存して、発見した位置を体育館マップ上にプロットして報告用の資料を作ります。ただし、単純に実装すると体育館が広すぎるため、自己位置同定に利用するレーザーが壁まで届かず（つまり、ロボットが目隠ししたまま進んでいる状態となる）、ロボットが自分の位置を見失い迷子になることが多く発生します。この問題を解決するために、自動走行には独自に開発したアルゴリズムを実装しました。実際に検査をしている様子を【図6】に示します。また、実際に都内の体育館を点検した結果を【図7(左)]に示します。バスケットコート2面の大きさの体育館をおよそ90分程度で検査を実施し、この検査では24個のささくれ

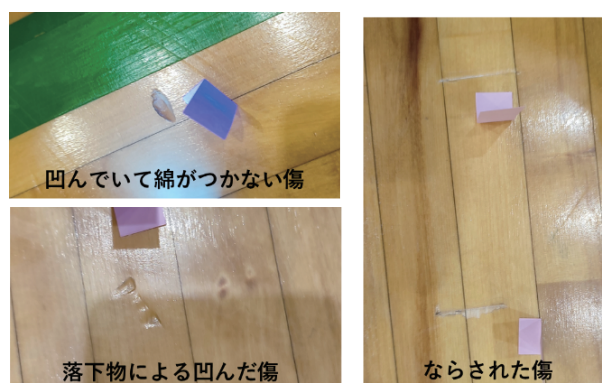
傷を検出しました。検出した位置を体育館の床マップにプロットしています。検出したささくれ傷の一部を【図7(右)】に示します。目視では分かりにくい細かいささくれ傷に蛍光綿（ブラックライトを照射しているので、赤く蛍光している）が付着しており、ささくれ傷が検出されていることが分かります。

開発したロボットの精度検証

これまでに、本学の体育館のみならず、関東近辺の複数の公共施設の体育館で述べ20回以上の実証実験を行ってきました。ロボットの自律走行に関する精度として、34 m×25.75 mの検査エリア（総検査面積は875.50 m²）、折り返し幅0.25 m、検査幅0.56 m、ロボットの検査走行回数52往復の条件で実証実験を行った結果、検査時間は72分であり、総検査漏れ面積は0.059 m²（0.007%）でした。1分あたりに約12.2 m²の床面積を自動で隈なく検査することが可能であることを示しています。また、綿の付着能力に関しては、ささくれ傷を模した端を浮き上がらせたクリップを1 m間隔で5個を体育館床に並べた列を2列作成し、その上を開発したロボットが20回走行するときに、何カ所のクリップに綿が付着するかを確認しました。その結果、94%以上の確率で綿がささくれ傷を模したクリップに付着することを確認しました。

さらに、綿の検出精度の検証として、体育館床の1 m間隔ごとに10カ所に少量の綿を固定して、その上をロボットが走行することにより、綿の検出精度を検証しました。極端に小さい綿でなければ、ほぼ100%の確率で綿を自動で検出できることが分かりました。

これらの結果を踏まえて、実際の都内の公共施設の体育館で点検業務をしている検査者とロボットでの検出結果の比較を行いました。約1面のバスケットコートで比較を行った結果、検査者が発見した傷は13カ所で、その内8つはロボットも検出可能でした。検査者が検出して、ロボットが検出できなかった残りの5つの傷は【図8】に示すように、ボールや何かを体育館床に落として凹んだ傷か、きれいにならされた傷でした。つまり、ささくれがなく綿がつかない、危険度の低い安全な傷でした。またロボットによる検査は、検査者が発見できなかった（しなかった）49カ所のささくれ傷を発見しました。これは、検査者が見落とすような細かい傷や見た目では分かりにくいささくれ傷を高感度で検出できることを示唆しています。



【図8】検査者が見つけてロボットが検出できなかった危険度の低い傷の一例

実用化に向けた取り組みと今後

利用方法によっては、検査者よりも効率よく高感度でささくれ傷を検出できることが分かりましたので、現在実用化に向けた製品開発に取り組んでいます。実際に売れるものを作ろうとすると、研究開発の段階では、まったく気にしていなかった様々な課題があります。例えば、安全設計や量産設計、コストの削減、操作性の向上、取り回しの快適性、メンテナンスのしやすさなど、研究段階ではほぼ考慮していないことに真剣に取り組む必要があります。また、ビジネスモデルをどのようにするかも、製品開発には大きく関わってきます。そこには、お金も運も実力も必要ですが、結局は開発者の熱い思いが重要になります。この課題を解決すべく、情熱をもって引き続き努力していきます。また、一緒に研究開発してくれる学生や企業を募集しています。興味がある方は、気軽にご連絡ください。

ここで紹介したように、我々の研究室では、基礎研究だけでなく社会的な課題やニッチなニーズを解決すべく研究開発も行っています。ロボットの研究開発も、ただ新しいものを作ればよいだけでなく、社会にいかに関与できるかも視野に入れた研究開発が必要になってきました。本当に役に立つものを作るには、大学での研究開発では不足する点が多く、企業などとの協力やビジネスをも視野に入れた研究開発が必要不可欠になります。いろいろな方向性を模索しながら社会貢献ができないかと、共同研究者と協力し、学生も巻き込みながら、新しいことに日々チャレンジしています。

まだまだ発展途上の研究もありますが、数年後には「商品化できた！」という報告ができるよう頑張っています。

