

20. 土工事の働き手を支援する動的モニタリングに関する研究

株式会社まざらん ○西垣重臣
株式会社キック 才原勝敏

1. 問題が潜在する環境と問題解決の動機

土工事においては、多くの働き手が目標に向かい協働することが求められる。一人作業を行うことが多いオペレータや運転手の孤独感をどう解消するか？ここでは、注意の狭隘化によるスリップとラプス、並びに近道心理によるルール違反などが発生するかもしれない。多くの働き手が多様な仕事をしている。施工状況を一目みて、理解することは難しい。施工状況が分からない苛立ちや不安をどのように解消するか？ここでは理解不足によるミステイクが発生するかもしれない。

働き手のコンストラクタビリティ(constructability)とヒューマンウェア(humanware)の低下はヒューマンエラーとルール違反、そして生産性低下の引き金になり得る。コンストラクタビリティとは、プロジェクト全体の目的を達成するために、計画、エンジニアリング、調達、建設作業に係る施工知識と経験を最適に活用することである¹⁾。ヒューマンウェア(humanware)とは、リーダーシップ機能とフォロワーシップ機能、そして両者の相互作用を集合的に示す用語である²⁾。ヒューマンエラーとは、意図しない結果を引き起こす人間の行為である³⁾。ルール違反とは、安全に関わる規則違反と知りながら、また危険な状態に陥る可能性を知りながら行う行為である⁴⁾。

動的モニタリングは、施工プロファイルに関する情報を提供することで、働き手の状況認識を促す。ここで動的とは情報の経時変化をいう。施工プロファイルとは、施工に伴って発生する事象の特徴、その特徴のパターンを示す指標などに関するデータ項目の集合である⁵⁾。状況認識とは、自らの周囲に何が起きているかを知る能力をいう⁶⁾。

動的モニタリングを実現するために、計測、データ圧縮、データ送信、受信データの蓄積と演算、定量的評価指標とインフォグラフィックスの自動生成などの一連の処理の自動化を図る。ここでの研究課題を以下に示す。

(1) 建設機械のIoT化

IoTとは、オブジェクト、人々、システム、そして情報資源を相互接続する知的サービスを伴うインフラストラクチャである⁷⁾。これは、物理的世界と仮想的世界の情報を処理し、両者の相互作

用を可能にする。建設機械のIoT化を実現したい。そこで、工事現場でのデバイス管理の煩雑さを回避するために、建設機械への車載が容易な「スマートフォンが内蔵するセンサ」と「シングルボードPCであるRaspberry Piをコアに組み立てたセンサ」を活用する。本論文では、前者をスマホ・センサ、後者をrasセンサと単に呼ぶことにする。

(2) 物理的の働き手がかり情報の整理

SRK(Skill-Rule-Knowledge)モデル⁸⁾に習い、生産性と安全性に影響を与える物理的の働き手がかり情報の特性要因を整理する。つぎに、計測する物理量の種類、並びに求める定量的評価指標とインフォグラフィックスを整理する。

(3) 強化学習の一つであるActor-Criticの枠組みに基づいた予測判別モデルの構築

強化学習とは、環境に対する試行錯誤を通じて、より良い行動を選択する学習制御の枠組みである。Actor-Criticは、強化学習の枠組みの一つであり、環境に対するActorの行動によって得られた状態または行動の価値を評価するCritic機能を持ち、Criticの強化信号により行動を選択していく制御の枠組みである。Critic機能を持つことで、専門家や熟練経験者などが持つ暗黙知を形式化して、制御の枠組みに導入できる利点がある。ここではActor-Criticの枠組みに基づいた予測判別モデルの構築実施手順が求められるとともに、予測判別モデルを工事現場に適用するための学習の仕方を学習することが必要である。

(4) 動的モニタリング構築方策

all-in-oneではなく、イージーオーダー方式のソリューションを求める。必要と思われる数理モデル群を持つ。工事現場のニーズに応じて、数理モデルを選択する。工事現場において、建設機械の稼働に伴って励起する物理量を計測し学習データとする。選択した数理モデルの汎化誤差評価とパラメータのチューニングを行い、予測・判別モデルを構築する。このモデルにより定量的評価指標を出力し、インフォグラフィックスを作成する方法を研究する。

2. 建設機械のIoT化

前述したように、工事現場でのデバイス管理の

煩雑さを回避するために、建設機械への車載が容易なスマホ・センサと ras センサを活用する。

スマホ・センサはスマートフォン Galaxy S3 に組み込まれている三軸加速度計、三軸角速度計、電子コンパス計、GPS 受信器などを使用する。計測データのログ機能とデータ送信を担うアプリケーションを持つ。そのアプリケーションの画面を図-1 に示す。

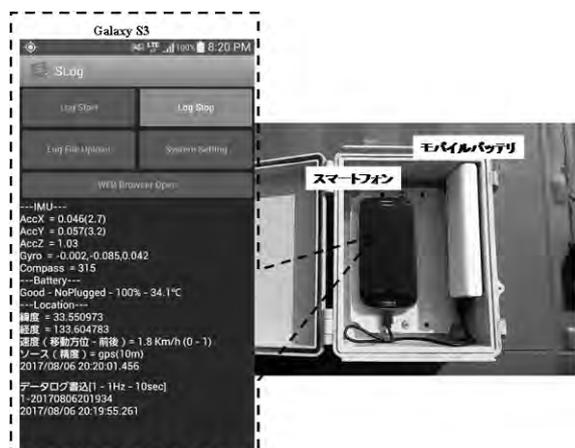


図-1 スマホセンサ・アプリケーション画面

ここで得られる計測データの変数名は、順に時刻、緯度、経度、移動方位、走行速度、x 軸加速度、y 軸加速度、z 軸加速度、x 軸角速度、y 軸角速度、z 軸角速度、No、電子コンパス、エリア id、x y、距離、FB (前進停止後進カテゴリ) などである。距離は建設機械間の大円距離である。エリア id は、計測装置が存在するエリアの識別番号 (積込場、荷下場、途中の道路など) である。X、Y は施工領域にメッシュを張ったときの番号である。FB は、GPS データの移動方位と電子コンパスが示す方位に基づいて、アプリケーションの移動状況を前進:1、停止:0、後進:-1 の数値でカテゴリ化した数列である。サンプリング周波数は 1 HZ~100HZ の範囲で問題に応じて選択する。

ras センサは、つぎに示すパーツと組込ソフトを使用して組み立てたセンサである (図-2)。

- (1) MPU/超小型演算装置 Raspberry Pi 2 Model B
- (2) SparkFun 9 Degrees of Freedom - Sensor Stick
 - ① ADXL345 3 軸加速度センサ
 - ② HMC5883L 3 軸方位センサ
 - ③ ITG-3200 3 軸ジャイロセンサ
- (3) GPS
 - ① GPS モジュール PA6H
 - ② SMA 型 外部 GPS アンテナ
- (4) 組込ソフト: Raspbian, Python

Ras センサの組み立て状況を図-2 に示す。ここで得られる計測データの変数名は、順に時刻、x

軸加速度、y 軸加速度、z 軸加速度、x 軸角速度、y 軸角速度、z 軸角速度、緯度、経度、速度、移動方位などである。サンプリング周波数は 100HZ~200HZ の範囲で問題に応じて選択する。

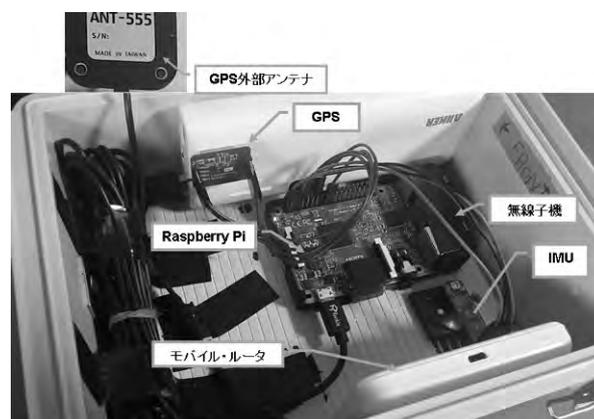


図-2 Ras センサの組み立て状況

3. 物理的の手がかり情報の整理

3.1 生産性と安全性に影響を与える物理的の手がかり情報の特性要因

SRK (Skill-Rule-Knowledge) モデル⁸⁾に習い、生産性と安全性への影響要因を、つぎに示す3つレベルに分ける。

(1) ナビゲーション (知識)・レベル

目標、目標への方向付け、目標と現状の不一致などを理解して、解決への道を発見するための順序、組み合わせ、筋書きなどの構造的な設定を行う。

(2) ルール・レベル

このレベルでは、過去の経験に基づき、蓄積したルールが使われる。物理的世界に対する定型的な操作と状態の再認と記憶されたルールの想起が主である。

(3) スキル・レベル

このレベルでは物理的対象物に対する自動的感覚運動操作が主である。

この SRK モデルを考慮して作成した、生産性と安全性に影響を与える物理的の手がかり情報の特性要因図を図-3 に示す。

3.2 安全性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックス

(1) 自由落下と衝撃

三軸加速度の計測値に基づいて、次式により時刻 t における三軸合成値(g_t)を計算する。

$$g_t = \sqrt{A_{xt}^2 + A_{yt}^2 + A_{zt}^2} \quad (1)$$

スマートフォンの自由落下に関して色々な研究がある^{9),10),11),12)}。これらの研究を参考にして、自由落下と衝撃を検知するための判断ルールをつぎのように設定している。

三軸合成値=<0.75g のとき自由落下の途中
三軸合成値>=1.2g のとき衝撃

三軸合成値>=1.4g のときやや強い衝撃
三軸合成値>=2g のとき強い衝撃

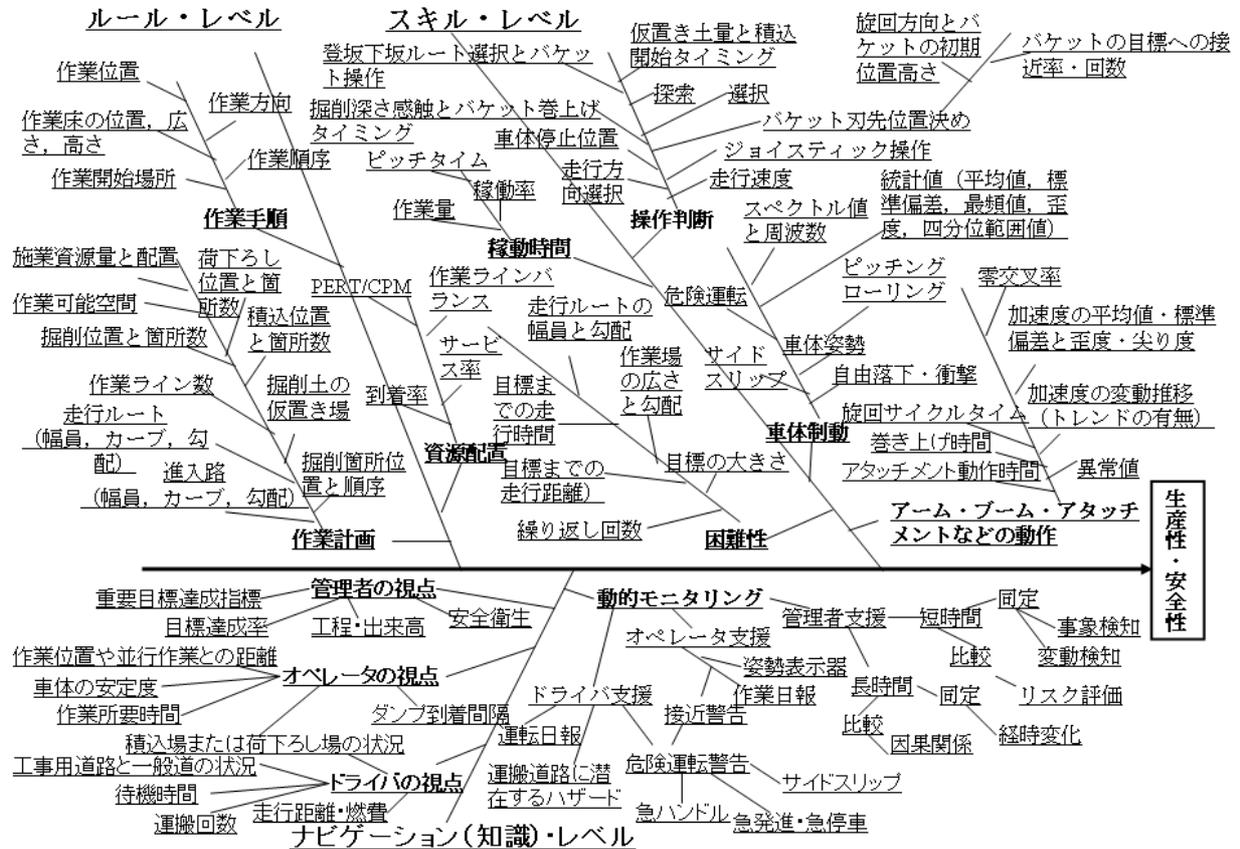


図-3 生産性と安全性に影響を与える物理的手がかり情報の特性要因図

(2) 急ハンドル

走行履歴の三点の緯度経度に基づいて、その三点が直線を形成しないときの曲率半径を求める。そのときの走行速度をその曲率半径で除した値を危険指標値とする。危険判断基準は道路構造令曲率半径第15条に示されている走行速度と曲率半径の値に基づいて設定する。本研究では、走行速度 20km/hr ときの許容基準を参考にして、危険判断基準値を”1.3”とする。危険指標値がこの値を超えるときに、急ハンドルが発生したと判断する。

(3) 急発進/急停止

三軸合成値の1階差分である躍度を求める。急発進/急停止の判断基準はつぎのとおりである。

- 急発進：躍度が+5km/s²以上のとき
- 急停止：躍度が-5km/s²未満のとき

(4) サイドスリップ

自動車工学の分野では、サイドスリップ角把握のための計測装置と計測方法、計算方法などについて多くの研究があり、市販の計測装置もある^{13),14)}。前述したように、工事現場でのデバイス管理の煩雑さを回避するために、スマートフォンに内蔵されている三軸加速度計とGPS受信機をセンサとして活用する。操舵角は走行履歴(緯度、経度)から求める。サイドスリップ角を次式より求める。

$$\text{sideSlipAngle} = \theta - \text{atan2}(a_x, a_y) \quad (2)$$

ここで、sideSlipAngle: サイドスリップ角, θ : 操舵角, atan2: 逆正接関数, a_x : 左右方向加速度, a_y : 前後方向加速度である。

自由落下と衝撃, 急ハンドル, 急発進/急停止, サイドスリップなどの発生箇所を施工平面図, 等高線図, google map, open street map な

どの上に重畳表示できる。どの図面または地図を選択するかは要求定義に依存する。

(6) 車体姿勢

三軸加速度と三軸角速度のデータに相補フィルタを適用して、車体のピッチングとローリングを求める。姿勢表示器(図-4)がオペレータにこれらの値を提示する。

(7) 接近警告

建設機械の現在位置(緯度経度)に基づいて、建設機械間の大円距離を求める。この大円距離が100m以下のとき、両者は接近していると判断し、スマートデバイスを起振することでオペレータにダンプトラックの接近を伝える。同時にスマートフォンの画面にどの方角から接近してくるかを表示する。図-4に、バックホウ・オペレータの例を示す。

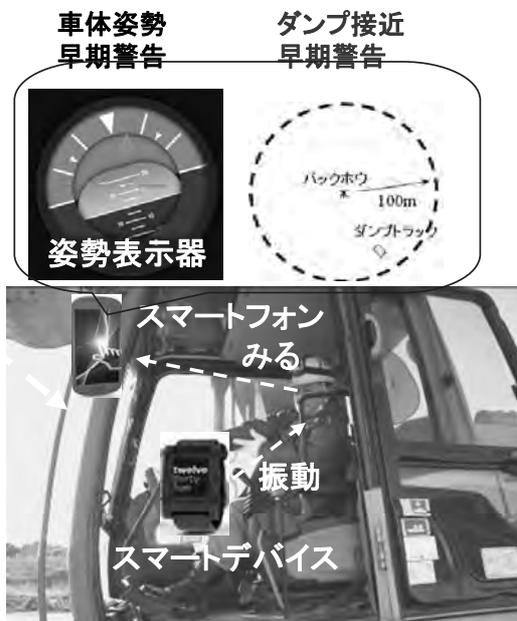


図-4 オペレータを支援する車体姿勢とダンプトラック接近の早期警告の例

(8) 早期警告のトリガ

これまでに述べた定量的評価指標に関して、つぎに示す基準に基づいて早期警告を発する。

簡便な方法であり、高い周波数や外れ値の影響を受けないと考えられる連検定の考え方を採用する。ここでは、計測データの連続的な上昇または下降を示す連数に注目する。一般に、連数“5”のときは注意が必要、連数“6”のときはアクションの準備を整える、連数“7”のときは原因究明と対策などのアクションをとる、といわれる¹⁵⁾。連数が“7”の事象が発生する確率は、一年内に交通事故に遭遇する確率に近似する。本研究では、連数が“7”に達したとき、または

既定の閾値に達したときに早期警告のトリガを引き、そのときの観測値(計測値、時刻、位置)を警告ポイントとする。

3.3 生産性に係る定量的評価指標とインフォグラフィックス

生産性に係る定量的評価指標の一部を以下に示す。

(1) 進捗率

施工日の施工実績数量を施工目標数量で除した比率である。進捗率を進捗率ゲージで示す。

(2) 掘削土量と荷下ろし土量

経度と緯度の平面に対して、それぞれの土量を高さで表現した三次元ヒストグラムを示す。

(3) 積込場と荷下ろし場の作業状況

積込場と荷下ろし場の作業状況を示すために、それぞれの作業場におけるダンプトラックの到着発進状況を発着累積グラフで示す。

(4) 実稼働時間と実稼働率

三軸加速度の分散の変化点を捉え、待機状態、アイドリング状態、稼働状態を識別するとともにそれぞれの時間と全時間を自動計算する。そして、実稼働時間と実稼働率を計算する。これらの情報を作業時間表と作業時間バーチャートで示す。さらに、積込と荷下ろしの所要時間とサイクルタイムの経時変化を折れ線グラフで示す。

(5) ピッチタイム(サイクルタイム)

ピッチタイムは実稼働時間を施工実績数量で除した比率である。言い換えれば、1仕事量に対するサイクルタイムを表す。各工程のピッチタイムをピッチダイヤグラムで示し、ラインバランス・ロス率を計算する。ピッチダイヤグラムとは各建設機械の稼働時間のバランス状態を図示したものである。ラインバランス・ロス率は(3)式で求められる。ここでピッチタイムはサイクルタイムを指す。

ラインバランス・ロス率 = (工程数 × ボトルネック工程のピッチタイム - 各工程のピッチタイムの合計時間) / (工程数 × ボトルネック工程のピッチタイム) (3)

(6) コンクリート打設速度管理

コンクリート打設速度をモニタリングする。センサとして、スマートフォンまたはアクティブ・タグを使う。コンクリート打設を行う区画ごとに、区画番号、練り混ぜ開始時間、完了目標時間、残時間などを表示する。カラーコード方式の警告を表示する。打設中の区画を背景が白で表示する。打設が終了した区画を背景が青

で表示する。残時間が1時間を切ると、背景が黄色になり、30分を切ると赤になる。

(7) ブルドーザ押土面積

ブルドーザの走行軌跡（緯度経度）に二次元カーネル密度関数を適用する。信頼区間を求め、その等値線を描画する。そして90%信頼区間の面積を求める。

(8) 出来高比率曲線図

横軸を時間経過比率、縦軸を出来高比率とし、進捗率の推移を示した図である。ベースライン曲線を施工時間時間経過比率30%と60%、並びに出来高比率25%と75%をマイルストーンとした折れ線を事前に描いておく。

(9) マッチファクタ

マッチファクタは施工資源のバランスを示す指標である。

例) 土運搬のマッチファクタ=トラック台数*積込所要時間/積込機械台数*トラックサイクルタイム

生産性に係るインフォグラフィックスの例を図-5に示す。



図-5 生産性に係るインフォグラフィックスの例

4. 動的モニタリングの枠組み

動的モニタリングの枠組を図-6に示す。この枠組みの構成要素をつぎに示す。

(1) 数理モデル群

①データクリーニング

イレギュラーな配列を持つレコード(tuple), 欠測値を含むレコード, 外れ値などを削除する。

②ローパスとハイパスのフィルタリング

③物理的手がかり情報に関する知識と、それを提供する数理モデルとインフォグラフィックス作成モデル

(2) 開発実行環境

R, Python, OpenCV, C++などのオープン・ソース・ソフトウェアを活用する。オープン・ソース・ソフトウェアは、ソフトウェアのソースコードが無償で公開され、改良や再配布を行うことが誰に対しても許可されているソフトウェアである。実行段階ではR.exe, Java script, SQL serverなどを活用する。

(3) 建設機械の振る舞いによって励起される物理量を計測するセンサ

(4) 計測データを保存するデータベース

(5) 動的モニタリング

動的モニタリングのモニタはオペレータとドライバを支援するモニタと現場管理者を支援するモニタに分かれる。動的とは経時変化する情報を取り扱うという意味である。オペレータとドライバの支援情報はリアルタイムに、現場管理者支援情報は5分乃至10分間隔で更新される。

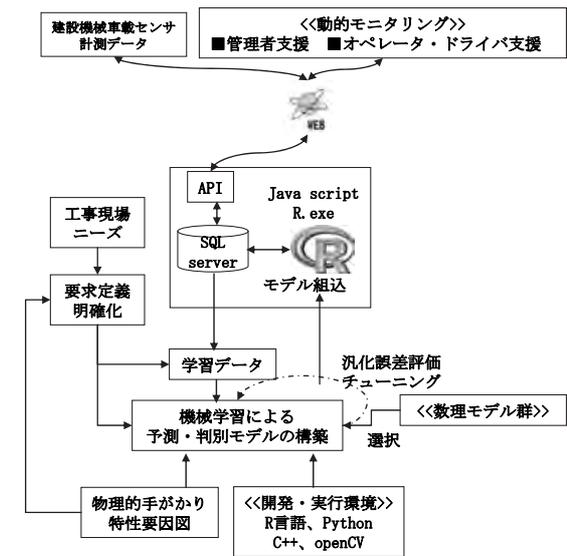


図-6 動的モニタリングの枠組

前述したように、動的モニタリングは、all-in-oneではなく、イージーオーダー方式のソリューションである。転移学習の考え方に基づいて、動的モニタリングを構築する。転移学習とは、ある問題を効果的かつ、効率的に解くために、別の関連した問題のデータや学習結果を再利用することをいう。工事現場のニーズに応じて要求定義を明確にし、学習データを取得する。学習データを解析することで、必要な数理モデルを選択し、Actor-Criticのモデルを構築し、ソリューションに組み込む。

5. 動的モニタリングの導入事例

動的モニタリングの導入事例を以下に示す。

(1) 無人化施工におけるオペレータ支援

無人化施工では、オペレータは、遠隔操作する建設機械の車体姿勢、振動、衝撃などを体感することができず、モニタを通じて推定することになる。接近警告、工事用道路に潜在するハザードの可視化、進捗状況把握などのリアルタイムフィードバックは、事前に心的準備ができるとオペレータに好評価を得ている。

(2) 土運搬工におけるドライバ支援

ドライバからつぎの評価を得ている。積込場と荷下ろし場、混雑する交差点などへの接近警告は注意を促され、心的準備ができる。さらに、運行履歴自動記録は運転日報作成業務の省力化になる。

(3) トンネル工事の作業ライン生産性の可視化

転移学習を活用し、Actor-Critic の枠組みに基づいて、トンネル工事の建設機械が形成する作業ラインの生産性の可視化ソリューションを構築に取り組んでいる。このソリューションが出力する実稼働時間は作業記録による稼働時間に概ね適合している。

(4) 林業機械の IoT 化

間伐施業工程において使用されるプロセッサ、フォワーダなどの林業機械の IoT 化に取り組んでいる。その際に、転移学習を活用し、作業時間自動算出、転倒、サイドスリップなどの危険警告などに関するソリューションを構築に取り組んでいる。

6. 今後の課題

この動的モニタリングの現場展開に係る今後の課題を、つぎに示す。

(1) データフュージョンの枠組み構築と実施手順の整理

今後の現場展開に際し、多種多様なセンサに直面するであろう。ここでは、異なった複数のデータの融合が求められる。

(2) 施工状況の総合評価指標

個々の定量的評価指標に加えて、一目みて理解できる総合評指標が求められる。

(3) 素早くより良いソリューションを構築するための学習の仕方の蓄積と仕事術 (work hacks) の整理。

参考文献

1) Construction Industry Institute Publication Nos.: 3-1 - Constructability: A Primer, 1986.

- 2) S. Nishigaki, J. Vavrin, N. Kano, T. Haga, J. Kunz and K. Law : "Human ware, Human Error, and Hiyari-hat: a Template of Unsafe Symptoms," Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 120, No. 2, pp. 421~442, ASCE, 1994.
- 3) 日本工業規格 JIS Z8115: ディペンダビリティ (信頼性) 用語 G20, p. 6, 2000.
- 4) Leadership and worker involvement toolkit: "Understanding human failure," the construction industry's Leadership and Worker Engagement Forum, HSE UK, 2003.
- 5) S. Nishigaki, H. Sugiura, T. Takamura, H. Ogura and K. Hatori: "STUDY ON FRAMEWORK OF CONSTRUCTION PROFILE FOR COLLABORATIVE AND INTELLIGENT CONSTRUCTION," Journal of Applied Computing in Civil Engineering, Vol.14, 2005.
- 6) Team Coordination Training (TCT): "SITUATIONAL AWARENESS," The U.S. Coast Guard's Boating Safety Division, 2004.
- 7) ISO/IEC JTC 1 Information technology: "Internet of Things (IoT)," Preliminary Report, 2014.
- 8) J. Rasmussen, "Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-13, No. 3, pp. 257~266, 1983.
- 9) S. Steidl, C. Schneider, M. Hufnagl: "FALL DETECTION BY RECOGNIZING PATTERNS IN DIRECTION CHANGES OF CONSTRAINING FORCES," Schreier G, Hayn D, Horbst A, Ammenwerth E, editors. Proceedings of the eHealth2012, pp. 27~32, 2012.
- 10) Ning Jia: "Detecting Human Falls with a 3-Axis Digital Accelerometer," Analog Dialogue, 2009.
- 11) Mitja Lutrek, Hristijan Gjoreski, Simon Kozina, Boidara Cvetkovi, Violeta Mirchevska, Matja Gams: "Detecting Falls with Location Sensors and Accelerometers," "Proceedings of the Twenty-Third Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference, pp. 1662~1667, 2011.
- 12) Kire Serafimov, Natasa Koceska: "PERVASIVE ALERT SYSTEM FOR FALL DETECTION BASED ON MOBILE PHONES," UGD Academic Repository, 2012.
- 13) Brendan Watts: "How and why does slip angle accuracy change with speed?" Slip Angle Accuracy, Version: 120802, 2012.
- 14) Michael Sayers: "Standard Terminology for Vehicle Dynamics Simulations," The University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), 1996.
- 15) 福田祐二: "生産現場の異常を検知, 品質管理に役立つ「C管理図」を使う," 2012.