重心及びＺＭＰ予測に基づく遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止制御

重松 康祐 *1，坪内 孝司 *2，皿田 滋 *3

Tip-over prevention control for teleoperated excavator based on CoG and ZMP prediction

Kosuke SHIGEMATSU*1, Takashi TSUBOUCHI*2 and Shigeru SARATA*3

*1 Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8573, Japan
*2,*3 Faculty of Engineering, Information and System, University of Tsukuba
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8573, Japan

Received 7 February 2017

Abstract

This paper describes tip-over prevention control of a teleoperated excavator based on center of gravity (CoG) and zero moment point (ZMP) prediction. This method predicts a future CoG and ZMP when an operation input is given. This allows the determination of the risk of tip-over by the operation input before an excavator moves. When the risk is detected, the operation input to the actuator is modified or stopped automatically to prevent from tip-over. Future CoG and ZMP is predicted by computing the movement of a teleoperated excavator based on an approximate excavator movement model. The proposed method successfully demonstrates tip-over prevention via scaled model experiments of the hydraulic drive.

Key words : Excavator, Tip-over prevention, Teleoperation, ZMP, Center of gravity

1. は　じ　め　に

土砂災害等の二次災害の恐れがある災害現場の初動対応においては，遠隔操縦の油圧ショベルが投入されることが多い (新田, 2012)．このような状況では，操縦者が搭乗しての操縦が極めて危険となる急傾斜地での移動や作業が求められる事例も多くみられる (図 1)．しかしながら，そのような場所では，走行装置やブーム等の作業装置の不用意な操作により，重心位置の変化や慣性力による影響で転倒の恐れが高まる．本稿では，これらの転倒危険のある動作のうち作業装置動作時の転倒防止制御について取り組む．

もし油圧ショベルに操縦者が搭乗していれば，車体の微妙な動きの変化を，車体の傾斜の変化や加速度として操縦者の体性感覚により認識でき，周囲の地形も瞬時に認識できるため，転倒の危険が伴うような動作を回避することができる．一方，遠隔操縦では，カメラ画像から機体の情報や周囲の地形を正確に認識できず，ショベルの動きの変化を操縦者が体性感覚で知覚することもできないので，これにより転倒の危険性を判断するのは困難である．また，カメラ画像や操縦信号には，通信遅延が生じる (林他, 2009) ため，転倒の危険をカメラ画像から判断できたとしても，転倒回避操作が手遅れとなる可能性が高い．前述した遠隔操縦による情報の欠如を補償する方法として，バーチャルリアリティ技術を活用して遠隔操縦者に機体の状態や周囲の状況を提示するシステムが開発されている (Zhao et al., 2002)．しかし，専用の座席やディスプレイ等の機材が大規模になり，災害の初動対応で求められる迅速な機材展開には困難が伴う．また，通信遅延の問題は残る．そこで，我々は，遠隔操縦者に頼らず，

No.17-00040 [DOI: 10.1299/transjsme.17-00040]
*1 正員， 筑波大学 大学院 システム情報工学研究科（〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
*2 正員，フェロー， 筑波大学 システム情報系
*3 筑波大学 システム情報系
E-mail of corresponding author: shigematsu-k@roboken.iit.tsukuba.ac.jp

Fig. 1 The teleoperated excavator removes the debris on steep slopes (The photograph is reproduced by courtesy of Kurihara city government).

遠隔操縦ショベル側での転倒防止制御によって，これらの問題を解決しようと考えた．この転倒防止制御は，遠隔操縦者の操作指令に対する将来の機体の転倒危険性を判断し，転倒の危険性がある場合には操作入力量を転倒しない範囲へ修正する，もしくは自動停止することで未然に転倒を防ごうとするものである．つまり，本提案手法により，転倒しない範囲の操作入力しかアクチュエータに与えないことを保証する．そのため，遠隔操縦指令やカメラ画像に遅延があっても本論文で提案する制御には影響を与えない．静的な状態では，重心の地面への鉛直投影点が支持多角形内に存在するか否かによって，転倒危険性判断は可能である．しかし，油圧ショベルの作業装置の質量及び動作速度の観点から，作業装置の動作による慣性力は無視できないため，静的な転倒危険性の判断のみでは不十分である．そこで，動的な転倒危険性の判断の指標として，ヒューマノイドの歩行制御に用いられる ZMP(Zero Moment Point)(Vukobratovic and Juricic, 1969) を併用する．本稿では，操縦者の操作入力に対する機体 ZMP 及び重心の予測に基づく転倒防止制御を提案し，模型車両による実験を通して本手法の実現可能性を示す．なお，本稿では，まず油圧ショベル自体の作業装置の動作によって転倒する場合を対象とし，掘削などの作業に伴うバケットと地面との接触やバケットに内容物が積載されることによる質量変化については考慮しないものとする．

2. 関　連　研　究

油圧ショベルは，移動マニピュレータの一種である．移動マニュピレータにおいては，以前から転倒防止制御に関する研究が行われている．これらの手法は大きく次の 2 つに分類される．一つ目は，転倒の危険があると判断される不安定な状態に陥った場合，もしくは陥りそうな場合に，マニピュレータの運動や走行装置の動作により安定性を回復し，転倒を防ぐ手法である (羽多野, 小原, 2005)，(Ray and Papadopoulos, 1997)．二つ目は，安定な動作経路計画を事前に行う手法である (黄他, 1995)．一つ目の手法を油圧ショベルに適用した場合，モータ駆動の移動マニピュレータと比較し，安定性を回復できる状況は限定的であると考える．また，遠隔操縦では，操縦者の意に反してまで安定回復のための動作を行うことは，地上物体との衝突回避の問題なども考慮しなければならず，また操作性の観点からも望ましくないと考える．これらのことから，遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止には，安定性の回復動作を行うというアプローチではなく，機体を不安定な状態に陥らせないというアプローチが適していると考えている．また，本研究では，遠隔操縦油圧ショベルを対象としており，事前に経路を計画することはできず，二つ目の手法を適用できない．

油圧ショベルにおいて，作業装置動作中の動的な転倒危険性の評価指標として，ZMP を用いた例がある．遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止のため，重心位置を使うことで，油圧ショベルの加速度変動による ZMP の誤差を抑えることができる Static compensation ZMP が提案された (Yu et al., 2012)．また，油圧ショベル各部に取り付けた加速度センサやシリンダストロークセンサなどから機体の姿勢や運動を計測することでリアルタイムに ZMP を算出し，ZMP により動的安定性を評価するシステムも提案されている (水落他, 2010)．さらに，ショベルの作業を停止させる時に，転倒の恐れがある場合に緩停止を行うことで転倒を防ぐ手法についても提案されている (水落他,

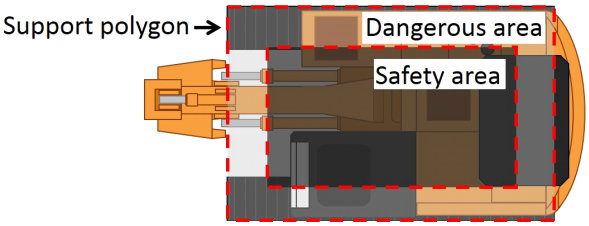


Fig. 2 Top view of a teleoperated excavator.

2012)．リアルタイムに算出した ZMP により遠隔操縦油圧ショベルの転倒を防ぐ手法として，オペレータに ZMP を提示することによりオペレータが転倒危険性を認識させることで転倒の防止を図る方法がある．しかし，オペレータと油圧ショベル間の通信には遅延があるため，オペレータによる転倒回避のための操作が手遅れとなる可能性が高い．また，リアルタイムに算出された ZMP を支持多角形内に留めるようにアクチュエータを自動的に制御する方法も考えられるが，油圧アクチュエータの応答性から制御が手遅れとなる可能性がある．そこで，著者らは，動き出す直前に，操作指令値を基に近い将来の ZMP 及び重心の変化を予測することで，危険の未然防止を考えている．したがって，リアルタイムの計測による計算よりもさら先立ってその予測をしたいと考える．また，本研究は任意の操作入力に対する ZMP を予測することで，任意の油圧ショベルの状態に対して作業装置動作に伴う慣性力による転倒の防止を図ることができる．さらに，ZMP 及び重心位置の予測に基づき，近い将来に転倒する危険がある姿勢になると予測された場合には，自動的に作業装置を停止させることで，姿勢変化による重心位置変化に起因する転倒の防止も図ることができる．

3. 転 倒 防 止 制 御

3·1 転倒危険性の判断指標

本研究では，静的な転倒危険性の判断指標として重心の鉛直床面投影点を用いる．油圧ショベルの機体の重心の鉛直床面投影点が支持多角形内であれば静的に安定であるが，重心の床面投影が支持多角形外に位置すると転倒が生じ始める．また，動的な転倒危険性の判断指標として ZMP を用いる．機体の ZMP が支持多角形内であれば動的に安定であるが，ZMP が支持多角形境界に位置すると履帯の一部がほとんど浮きかけている状態であり，転倒危険のある状態であると考えられる．理想的には，これらの重心の鉛直床面投影点及び ZMP を支持多角形の内側に保つことで油圧ショベルの転倒を防ぐことできる．しかしながら，実環境においては，履帯と床面との接触状態が不明であることや転倒防止制御に誤差が含まれることを考慮し，安全のためのマージンとして図 2 に示すように支持多角形の内側に安全領域を設定する．そして，提案する転倒防止制御によって重心の鉛直床面投影点及び ZMP を安全領域の内側に保つことで油圧ショベルの転倒防止を図る．安全領域のマージンを大きく設定し過ぎるとオペレータの操作が必要以上に転倒防止制御の介入を受け，操作性が大きく低下する恐れがある．そのため，安全領域は平地など転倒の恐れがない状況においては操作入力に対する転倒防止制御による介入が発生しない程度に設定することを想定している．

3·2 転倒防止制御のコンセプト

図 3 に一般的な遠隔操縦油圧ショベルのシステム構成を示す．遠隔操縦者は，カメラ画像に基づき，転倒の危険回避に常に注意を払いながら操縦を行う．しかし，カメラ画像による危険性判断の困難性や通信遅延の影響により，遠隔操縦者が油圧ショベルの転倒を回避することは難しいと考えている．また，操縦信号は直接アクチュエータに与えられるため，操縦者の不用意な操作や誤操作により機体が転倒する恐れがある．

本稿では，油圧ショベル自体の作業装置の動作によって転倒する場合を対象とし，掘削などの作業に伴うバケットと地面との衝突や掘削反力による転倒については対象としないものとする．このような前提条件の下では，油圧ショベルが転倒するケースは以下の 2 つが考えられる．

・ケース 1　作業装置動作に伴う慣性力による転倒
・ケース 2　作業装置動作に伴う重心位置変化による転倒

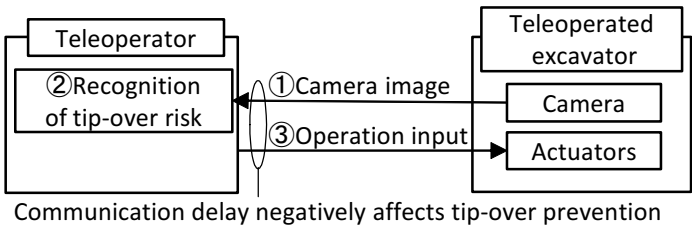


Fig. 3 General system configuration.

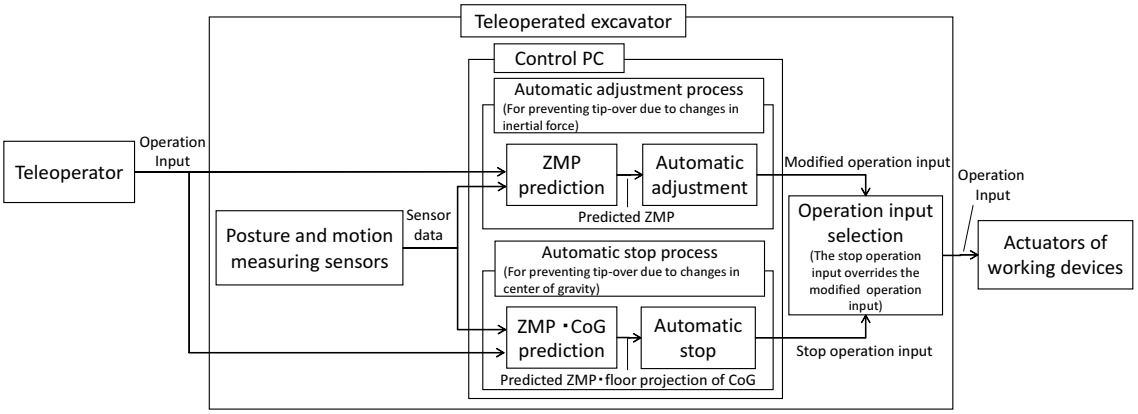


Fig. 4 Proposed system configuration.

ケース 1 は，転倒危険性のある慣性力を作業装置の動作により発生させないよう操作入力を自動調整することで防ぐことができる．つまり，この操作入力の自動調整により，作業装置動作時の加速度を機体の転倒が生じない範囲に制限するものとなっており，加速度を滑らかにするものである．ケース 2 は，転倒危険性のある重心位置となる姿勢になる前に自動停止させることで防ぐことができる．これは，油圧ショベルの姿勢に制限を与えるものである．これらケース 1 及びケース 2 に対する対応である操作入力の自動調整及び自動停止を組み合わせることで，動作時の加速度と姿勢が制限され，静的及び動的な転倒を防ぐことが期待できる．

上に述べた考察より，本論文で提案するシステム構成を図 4 に示す．自動調整プロセスは，遠隔操縦者が与えた操作入力及び機体のセンサ情報から予測した将来の ZMP に基づき動的に安定な範囲に調整された操作入力をアクチュエータに与えることで，動的に安定な機体状態を保つ．自動停止プロセスは，操作入力及び機体のセンサ情報から予測した将来の重心の鉛直床面投影点を予測し，転倒危険性を判断する．そして，転倒の危険がある場合には，予測した将来の重心の鉛直床面投影点及び ZMP に基づき静的及び動的に機体を安定に保ちながら作業装置を自動停止させる．自動停止プロセスによるアクチュエータに対する入力は，自動調整プロセスよりも優先させることで，自動的かつ安全に作業装置を停止させることができる．転倒危険性の予測や操作入力修正の計算時間は，アクチュエータの動作までの遅延時間や通信遅延時間に比べて非常に短い時間であることが期待できるため，転倒の防止を妨げる程の悪影響はないと考えられる．

3·3　操作入力の自動調整プロセス

作業装置を動かす際の慣性力による転倒を防ぐため，ZMP が安全領域を超えないように操作入力を自動的に調整する．図 5 の左に操作入力の自動調整の処理フローを示す．また図 5 の右に，その動作の典型的な想定例を示す．操縦者の操作入力量から，ある時刻 t 秒までの ZMP を油圧ショベルの運動モデルに基づき予測し，それを予測 ZMP と定義する．そしてその予測 ZMP が設定した安全領域内であれば，操作入力をアクチュエータへの動作指令としてそのまま与える．また，予測 ZMP が，安全領域外であれば，操作入力量を少しずつ増加・減少させ，安全領域内に入るまで再計算を繰り返す．これにより，ZMP が安全領域を超えない操作入力に修正することができる．図 5 左のフローでのアクチュエータへの操作入力の計算は，ショベルが転倒する動きに比べ十分早く終了

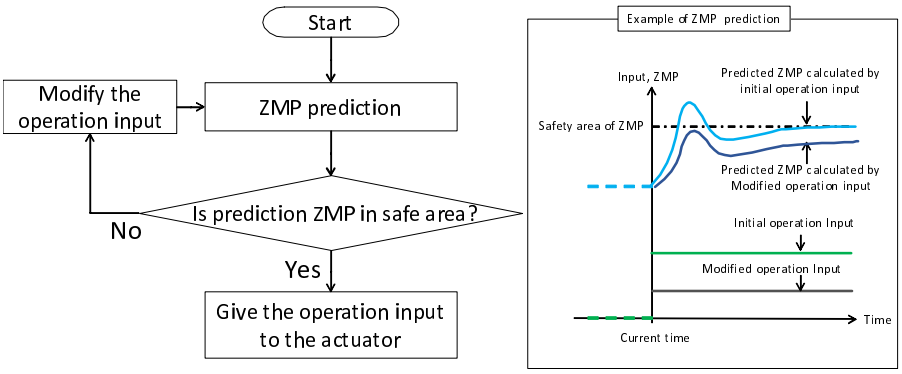


Fig. 5 Flowchart of automatic adjustment of the operation input.

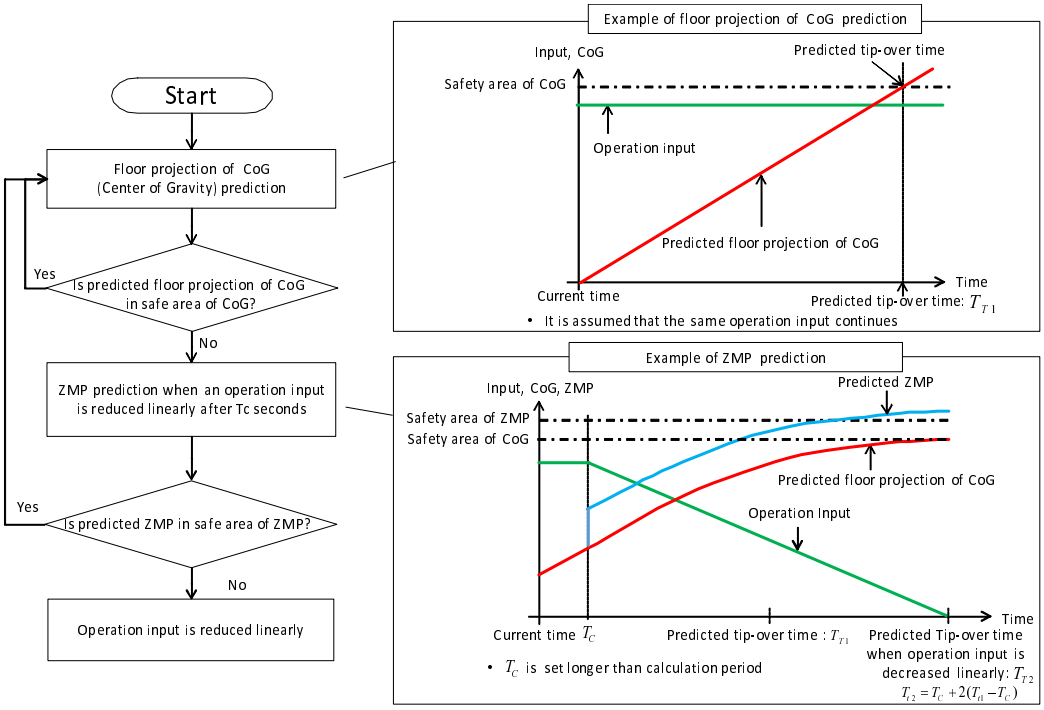


Fig. 6 Flowchart of automatic stop process.

することを仮定する．

3·4　自動停止プロセス

図 6 の左に自動停止の処理フローを示す．また図 6 の右にその動作の典型的な想定例を示す．操作入力及びセンサ情報からある時刻 t 秒までの重心の鉛直床面投影点を油圧ショベルの運動モデルに基づき予測する．もし, 重心の鉛直床面投影点が重心の安全領域を超えると予測された場合は，$T_C[s]$ 後から安全領域を超えると予測される時間 $T_{T2}[s]$ まで操作入力を単調減少させた時の ZMP を予測する．もし，ZMP が安全領域を超えると予測される場合には，$T_C[s]$ 後から停止を開始した場合に転倒の危険があると判断できるため，現時刻から安全領域を超えると予測される時間にかけて停止を行う．$T_C[s]$ は，計算周期より大きい値に設定することで，自動停止が手遅れになることを防ぐ．

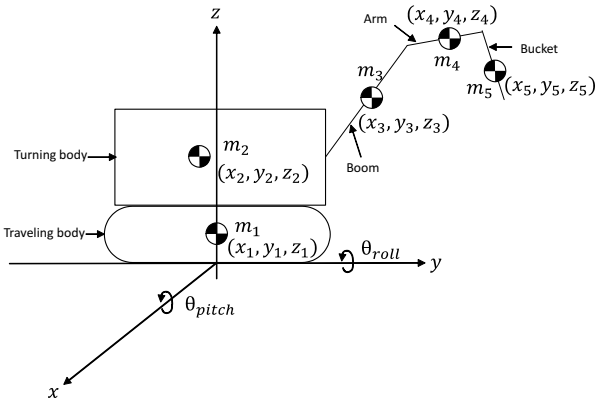


Fig. 7 Approximatation by mass system.

4. 重心及び ZMP の予測

4·1 重心の鉛直床面投影点及び ZMP の算出方法

図 7 に示すように車両各部を質点系として近似すると，重心の鉛直床面投影点は次式の通り，質点位置，質量及び車両傾斜角度より算出できる．各リンクの質点位置はシリンダストロークセンサ等により計測したシリンダ長及びリンク構造より算出できる．また，車両傾斜角度は，加速度センサ等により計測できる．バケット内に土砂等が積載されるとバケットの質量及び質点位置が変化するが，本稿ではバケット内の内容物による質量変化は考慮しないこととする．

$$CoG_x = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i\{g\cos\theta_{roll}x_i - g\sin\theta_{roll}z_i\}}{\sum_{i=1}^{N} m_i g\cos\theta_{roll}} \tag{1}$$

$$CoG_y = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i\{g\cos\theta_{pitch}y_i - g\sin\theta_{pitch}z_i\}}{\sum_{i=1}^{N} m_i g\cos\theta_{pitch}} \tag{2}$$

ZMP は次式の通り，質点位置，質量，加速度及び車両傾斜角度から算出できる．各質点の加速度は，質点速度の後退差分により算出し，質点速度は質点位置の後退差分より算出することができる．

$$ZMP_x = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i\{(\ddot{z}_i + g\cos\theta_{roll})x_i - (\ddot{x}_i + g\sin\theta_{roll})z_i\}}{\sum_{i=1}^{N} m_i(\ddot{z}_i + g\cos\theta_{roll})} \tag{3}$$

$$ZMP_y = \frac{\sum_{i=1}^{N} m_i\{(\ddot{z}_i + g\cos\theta_{pitch})y_i - (\ddot{y}_i + g\sin\theta_{pitch})z_i\}}{\sum_{i=1}^{N} m_i(\ddot{z}_i + g\cos\theta_{pitch})} \tag{4}$$

これらの重心の鉛直床面投影点及び ZMP を予測するためには，油圧ショベルの動作に伴い時々刻々と変化する質点の位置及び質点加速度を予測する必要がある．そのため，油圧ショベルのアクチュエータの動きを予測することができれば，重心の鉛直床面投影点及び ZMP が予測できる．

4·2 油圧ショベルの動作のモデル化

前述した通り，操縦者の操作入力に対する将来の重心の鉛直床面投影点や ZMP を予測するためには，操作入力に対する将来の油圧ショベルの運動を予測する必要があるため，油圧ショベルの動作をモデル化する必要がある．油圧ショベルの運動学や動力学のモデルについては，V-REP(Coppelia Robotics, 2017) や Gazebo(Open Source Robotics Foundation, 2017) 等のシミュレータを用いることで構築可能であり，油圧システムについては Matlab/Simulink Simscape Fluids(MathWorks, 2017) 等を用いることでモデル化できる．しかしながら，これらの様な物理モデルを用い，将来の油圧ショベルの運動を高周期にシミュレーションできるほど高性能な計算機を油圧ショベルに搭載することは不可能ではないが現実的ではない．また，油圧ショベルの物理モデルを構築するためには，油圧シリンダや関節の摩擦，作動油の特性，スプール弁の応答特性等のさまざまなパラメータが必要であるが，これらを

精度良く同定するのは困難かつ多大な労力を要する．また，これらのパラメータは油圧ショベルの機種ごとに異なるため，様々な機種に本手法を適用することを考えれば，同定すべきパラメータの数はそれほど多くなく，またその同定も容易であることが望ましい．

先行研究 (倉鋪他, 2013) では，操作入力に対する油圧ショベルの関節角速度応答を 2 次遅れ系及びむだ時間要素として近似することで，実機の応答を模型車両により再現している．油圧シリンダ及び油圧モータは，負荷や摩擦の無い理想的な環境ではスプール弁の開度に比例したシリンダ速度，旋回速度となる．そのため，操作入力量に比例したスプール弁の開度が与えられるとすると，アクチュエータの速度は操作入力量に比例した定常値となるが，スプール弁の応答遅れや作動油の圧縮性等による応答遅れが生じる．また，近年の一般的な油圧ショベルでは，負荷によらず操作入力量とアクチュエータの速度が比例するように制御が行われているため，制御遅れも生じる．本研究では，これらの応答遅れを包含するアクチュエータの速度応答を簡易にモデル化することを目的とし，操作入力に対する速度応答を次式のように 2 次遅れ系として近似する．ここで，V は速度，ω は固有振動数，ζ は制動係数，Vmax は 100 % の操作入力量に対する速度，I は 0〜100 % の操作入力量である．これらのパラメータは制御対象の機体応答に式 (5) をフィッティングすることにより同定する．油圧シリンダについては，シリンダ延伸時と縮小時では，作動油の流路や受圧面積が異なるためそれぞれ別にパラメータを求める．また，加速時と減速時では力が発生する原理が異なるため，それぞれ別にパラメータを求める．式 (5) の解を操作入力 100 %時のアクチュエータの動作速度のステップ応答に最小二乗法でフィッティングさせることによりパラメータを同定する．

$$\frac{d^2V(t)}{dt^2} + 2\zeta\omega\frac{dV(t)}{dt} + \omega^2 V(t) = \omega^2 V_{max} I \tag{5}$$

4·3　油圧ショベル動作モデルに基づく重心及び ZMP 予測方法

現在の操作入力が維持されたと仮定して式 (5) を解くことにより，近未来（例えば 2 s 後）までのアクチュエータの動きをシミュレーションする．予測されたアクチュエータの動作から機体運動のシミュレーションを実行し，将来の ZMP 及び重心を予測する．図 8 に ZMP 予測のアルゴリズムを図 9 に重心の予測のアルゴリズムをそれぞれ示す．

5. 実　　験

5·1　油圧ショベルの実験用模型

油圧ショベルの実験用模型車両として RC4WD 社製の 1/12 Scale Earth Digger 4200XL Hydraulic Excavator を使用して実験を行った．模型車両の質量は 18 kg，履帯長は 400 mm，履帯幅は 248 mm である．ブーム，アーム及びバケットについては，油圧シリンダにより駆動し，基本的な動作原理は実機と同様である．油圧バルブはロータリバルブであり，ロータリバルブをサーボモータで回転させることにより油圧シリンダを制御している．

この模型車両では，上部旋回体の旋回は電動モータによって行っている．この実験では，この旋回のためのモータをツカサ電工社製 TG-05P-SG-150-HA に交換し，エンコーダとしてオムロン社製 E6A-GWZ3C を搭載した．モータドライバは，ツジ電子社製 TF-2MD3-R6 を用いた．

図 10 に模型車両の座標系を示す．表 1 に模型車両各部の重心位置及び質量を示す．ブーム，アーム及びバケットのシリンダ長を計測するため，各シリンダにワイヤ式のポテンショメータ (セレスコ社製 SM2-12) を取り付けた．ポテンショメータの出力値は，マイコンボード (Arduino Uno) を介し，10 bit で量子化する．各シリンダの速度，加速度は，30 ms の後退差分により算出する．各シリンダのスプール弁を駆動するためのサーボモータは，マイコンボード (Arduino Uno) を介し，PC から制御する．

5·2　床反力計測装置

実験では計算による ZMP の予測と実際の模型車両の ZMP の動きを比較したい．そのための計測装置として，図 11 に示すように天板の木材にロードセル（Measurement Specialties 社製 FC2231）を 4 か所に取り付けた床反力計測装置を製作した．ZMP は，床反力の圧力中心であるため次式の通り，各ロードセルに加わる圧力分布により算出できる．

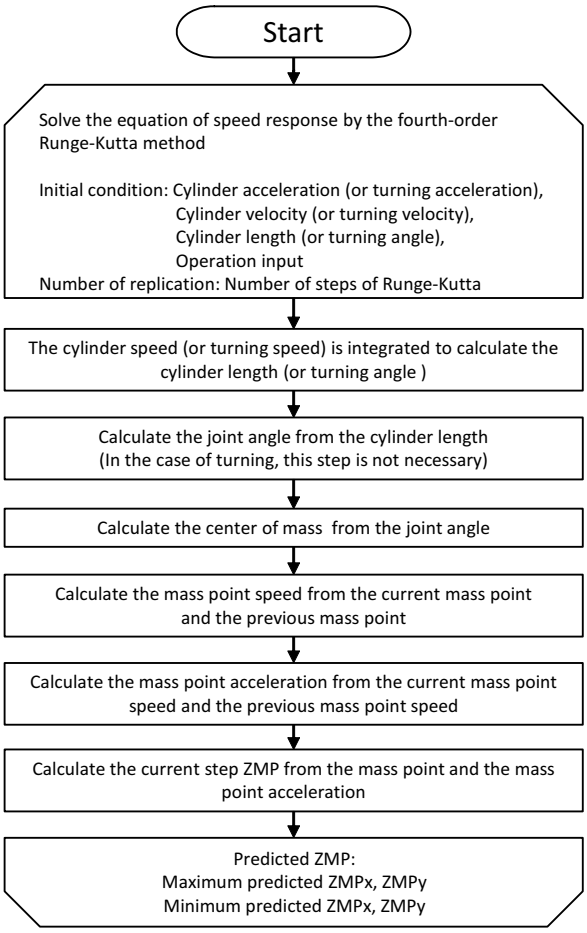


Fig. 8 Flowchart of ZMP prediction.

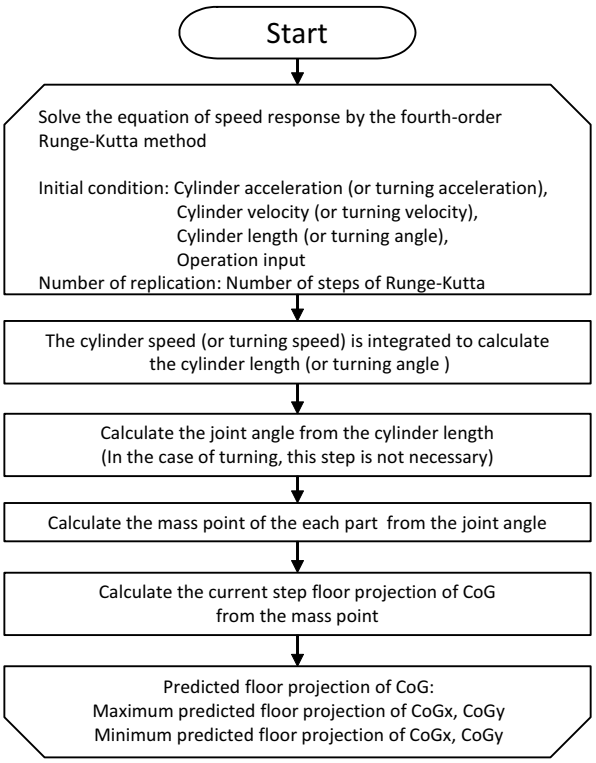


Fig. 9 Flowchart of CoG prediction.

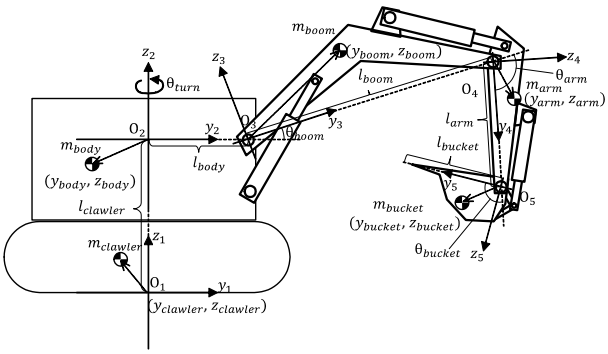


Fig. 10 Coordinate system.

$$ZMP_x = \frac{F_1P_{1x} + F_2P_{2x} + F_3P_{3x} + F_4P_{4x}}{F} \tag{6}$$

$$ZMP_y = \frac{F_1P_{1y} + F_2P_{2y} + F_3P_{3y} + F_4P_{4x}}{F} \tag{7}$$

ここで，$F_{1\sim4}$ は各ロードセルの出力値，$P_{1x\sim4x}$ は各ロードセルの位置の x 座標，$P_{1y\sim4y}$ は各ロードセルの位置の y 座標，F は各ロードセルの出力値 $F_{1\sim4}$ の総和である．

Table 1 Parameters of scale model

	Mass[g]	Center of gravity[mm]		Link length[mm]
	m	x	y	l
Traveling body (Body)	7,054	-10.5	45.1	168
Turning body (Crawler)	7,915	-115.3	-33.1	12
Boom	1,562	228.0	51.8	480
Arm	672	107.3	17.0	260
Bucket	671	29.6	45.5	125

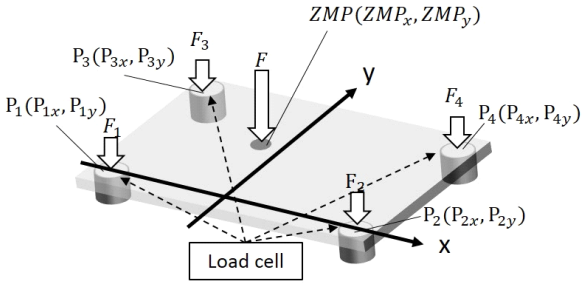
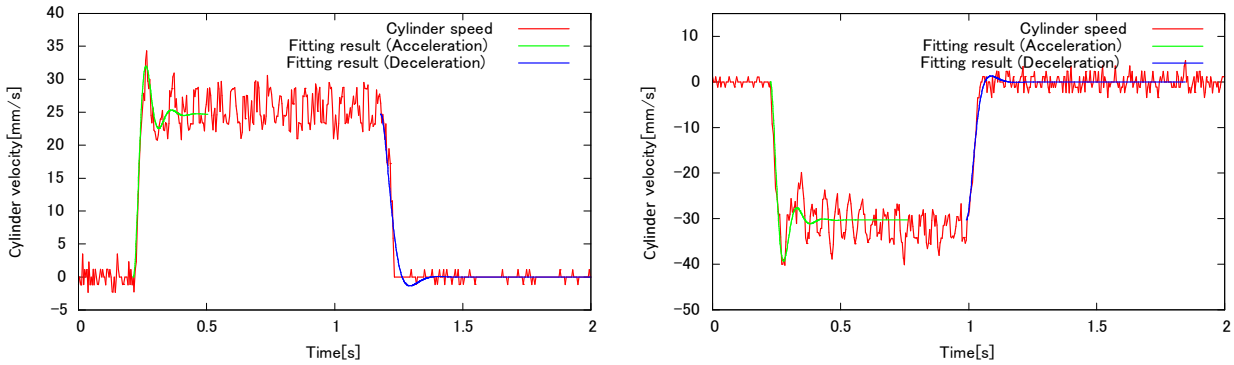


Fig. 11 Floor reaction force measuring device.



(a) Boom lifting (b) Boom lowering

Fig. 12 Fitting result of the boom cylinder.

5·3 油圧ショベルの運動モデルのパラメータ同定

本稿では，模型車両のブームシリンダ及び旋回モータの式 (5) の未知パラメータを求めた．パラメータは，ブームシリンダ及び旋回モータを動作させたときの速度応答の計測値に式 (5) を最小二乗法でフィッティングさせることにより求めた．ブームシリンダは，ブームを 0 ° から 24 ° まで動作させ，アーム角度は 163 °，バケット角度は 144 ° とした．旋回については，上部旋回体を 30 ° 旋回させ，ブーム角度は 13 °，アーム角度は 139 °，バケット角度は 144 ° とした．図 12，図 13 に，ブームシリンダ，旋回モータ動作時の実測値とフィッティング結果をそれぞれ示す．表 2，表 3 に，ブームシリンダ，旋回モータの求めたパラメータをそれぞれ示す．

5·4 操作入力の自動調整実験

操作入力の自動調整の有効性を確認するため，転倒の危険がある状況における操作入力の自動調整の有無による挙動の差異確認した．転倒の危険がある状況を模擬するため，図 14 に示すように，35 ° の傾斜台上に床反力計測装置を配置し，その上に斜面と履帯が平行となるように模型車両を配置した．動作は，ブームの上下及び旋回動作を行った．ブーム上げは，ブーム角度 50 ° から 63 ° まで動作を行い，アーム角度は 90 °，バケット角度は 144

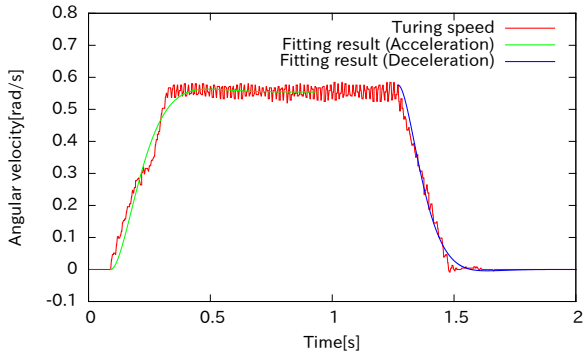


Fig. 13 Fitting result of the turning motor.

Table 2 Parameters of velocity response (Boom cylinder)

Parameters	V_{max}[mm/s]	ω	ζ
Accelerate(stretching)	24.7	68.1	0.36
Decelerate(stretching)	24.7	37.7	0.68
Accelerate(shrinking)	-30.3	65.2	0.36
Decelerate(shrinking)	-30.3	46.4	0.71

Table 3 Parameters of velocity response (Turning motor)

Parameters	V_{max}[rad/s]	ω	ζ
Accelerate	0.55	0.80	12.87
Decelerate	0.55	0.84	15.99

°，旋回角度は左 90 ° とし，上部旋回体を斜面下側に向けた状態とした．ブーム下げは，ブーム角度 65 ° から 55 ° まで動作を行い，アーム角度は 75 °，バケット角度は 144 °，旋回角度は左 90 ° とした．旋回は，上部旋回体を履帯正面に向けた状態から斜面上側に向けて右に 45 ° 旋回を行い，ブーム角度は 52 °，アーム角度は 37 °，バケット角度は 144 ° とした．重心の安全領域は ±124 mm とした．操作入力の修正刻みは 1 %とし，将来の ZMP の予測時間は 0.5 s とした．

ブーム上げ時の結果を図 15 に，ブーム下げ時の結果を図 16 に，旋回動作時の結果を図 17 に示す．また，ブーム上げ時の実験の様子を図 18 に，ブーム下げ時の実験の様子を図 19 に，旋回動作時の実験の様子を図 20 に示す．ZMP の正方向が車両前方であり，負方向が車両後方である．ブーム上げ時，下げ時，旋回時ともに操作入力の自動調整ありの場合においては，操作入力が修正されることで，ZMP の変動を抑えられ，計測された床反力中心が安全領域を超えていないことが確認できた．また，ブーム下げ時においては，操作入力の自動調整なしでは転倒したが，操作入力の自動調整を行うことで，転倒を防ぐことができた．

5·5　自動停止実験

提案する自動停止の有効性を確認するため，5·4 と同様の配置で実験を行った．上部旋回体は，履帯正面から 90 ° 右に向け，上部旋回体を斜面上側に向けた姿勢から，斜面下側に向けて 180 ° 左旋回を行った．この時，操作入力量は 100 %とし，ブーム角度は 43 °，アーム角度は 29 °，バケット角度は 144 ° とした．

重心及び ZMP 予測に基づく自動停止ありの条件，自動停止なしの条件，また，比較対象として重心の鉛直床面投影点が安全領域を超えた場合に旋回動作を停止する条件の 3 つの条件で実験を行った．重心及び ZMP 予測に基

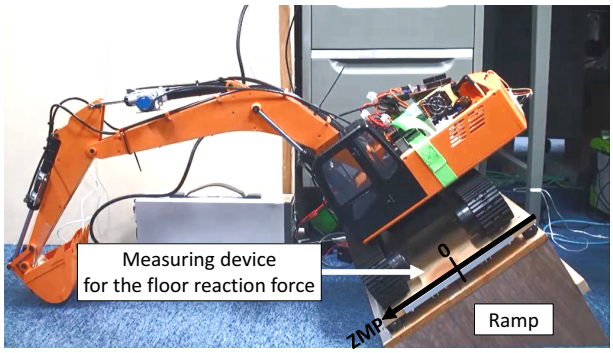
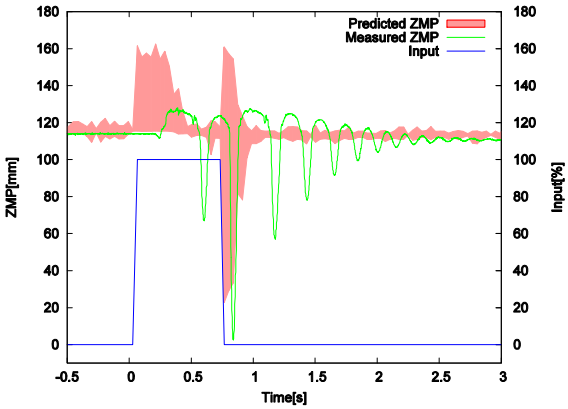
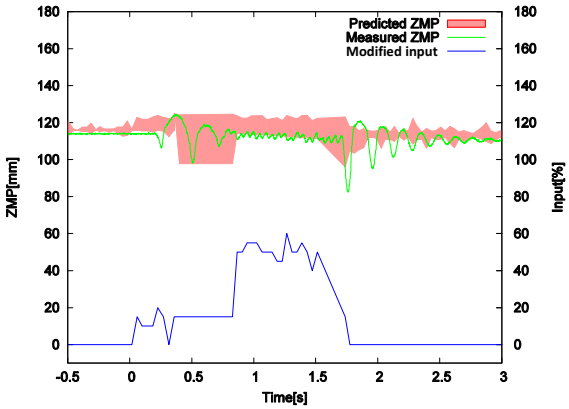


Fig. 14 Arrangement of experimental devices.

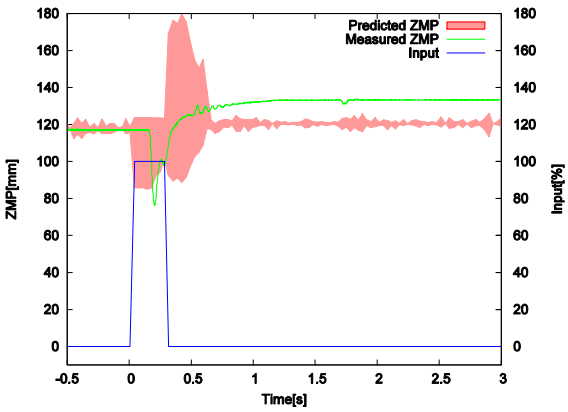


(a) Without automatic adjustment of operation input

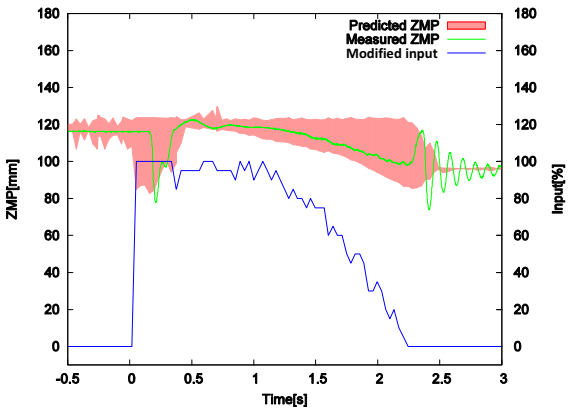


(b) With automatic adjustment of operation input (safety area:±124 mm)

Fig. 15 Experimental result of boom lifting.



(a) Without automatic adjustment of operation input

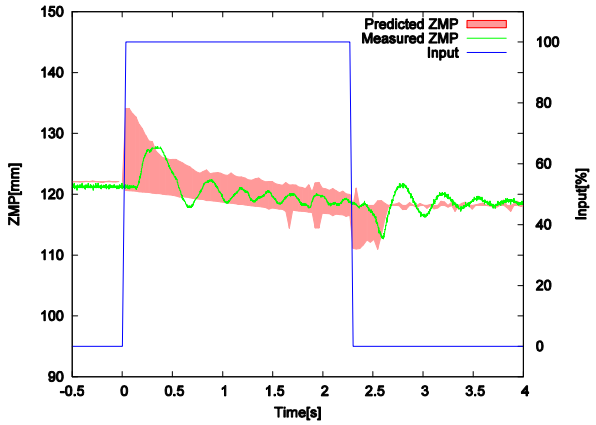


(b) With automatic adjustment of operation input(safety area:±124 mm)

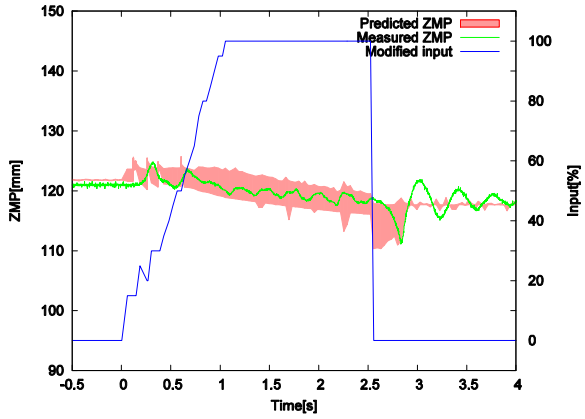
Fig. 16 Experimental result of boom lowering.

づく自動停止における重心安全領域は ±120 mm とし，ZMP 安全領域は ±124 mm とした．将来の重心及び ZMP の予測時間は 2 s とした．

実験結果を図 21 に示す．また，実験の様子を図 22 に示す．結果より，自動停止なし及び重心の鉛直床面投影点が安全領域を超えた場合に旋回動作を停止させる条件では転倒が生じたが，提案する自動停止ありの場合では，

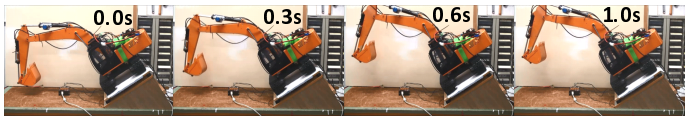


(a) Without automatic adjustment of operation input



(b) With automatic adjustment of operation input(safety area:±124 mm)

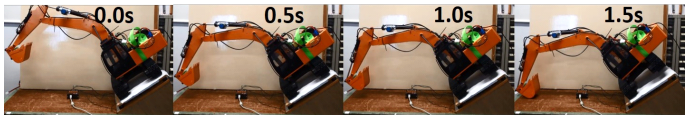
Fig. 17 Experimental result of turning.



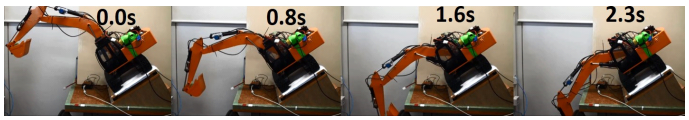
(a) Without automatic adjustment of operation input

(b) With automatic adjustment of operation input (safety area:±124 mm)

Fig. 18 Experimental appearance of boom lifting.



(a) Without automatic adjustment of operation input



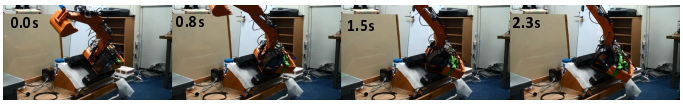
(b) With automatic adjustment of operation input (safety area:±124 mm)

Fig. 19 Experimental appearance of boom lowering.

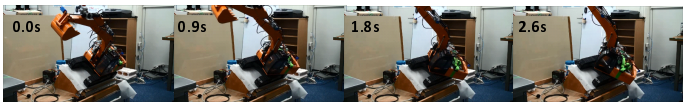
転倒しないことが確認できた．自動停止なしの条件では，重心の鉛直床面投影点が支持多角形を超え，静的に不安定になることにより転倒が生じた．また，重心の鉛直床面投影点が安全領域を超えた場合に旋回動作を停止する条件では，重心の鉛直床面投影点は支持多角形を超えていないが，計測 ZMP が支持多角形を超え，動的に不安定になることにより転倒が生じた．一方，自動停止ありの条件では，重心の鉛直床面投影点及び ZMP が支持多角形内に留まっており，静的及び動的に安定に停止できていることが確認できる．

6. まとめ及び今後の予定

本稿では，重心及び ZMP 予測に基づく遠隔操縦油圧ショベルの転倒防止制御を提案した．本転倒防止制御は，操作入力の自動調整プロセスと自動停止プロセスの 2 つの要素で構成される. 操作入力の自動調整プロセスは, 将

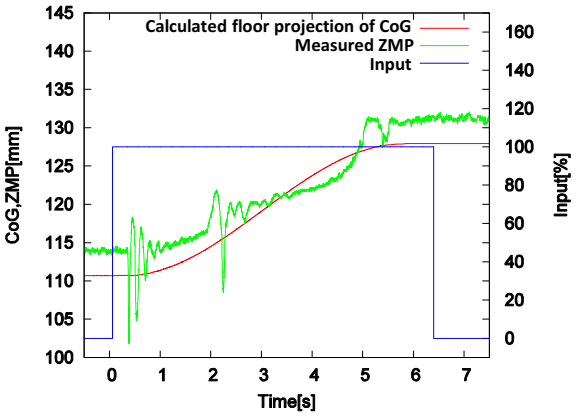


(a) Without automatic adjustment of operation input

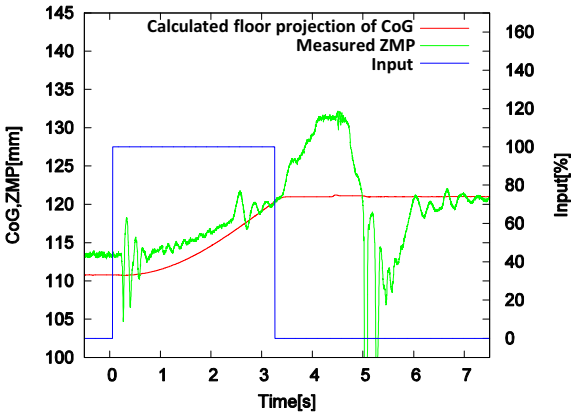


(b) With automatic adjustment of operation input (safety area:±124 mm)

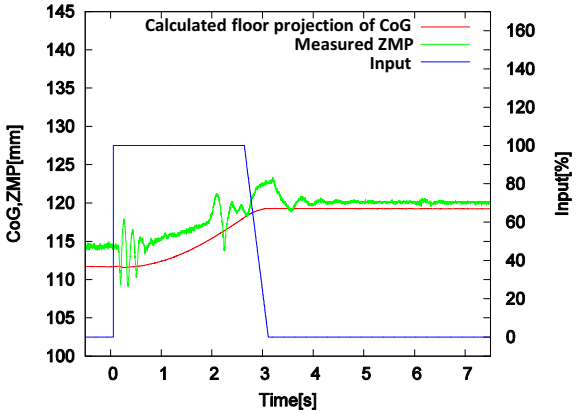
Fig. 20 Experimental appearance of turning.



(a) Without automatic stop



(b) With automatic stop when floor projection of CoG exceed±124 mm



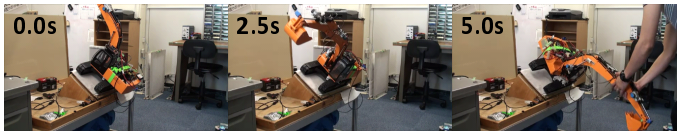
(c) With proposed automatic stop（ZMP safety area：±124mm，CoG safety area：±120 mm）

Fig. 21 Experimental result of automatic stop.

来の機体 ZMP を予測し，予測した ZMP に基づき，機体が安定であると予測される範囲に操作入力を自動調整することで機体を安定に保つものである．自動停止プロセスは，将来の機体重心及び ZMP を予測し，予測した機体重心及び ZMP に基づき将来の転倒危険性を判断し, 転倒の危険がある場合には，機体を安定な状態に維持しながら作業装置を自動的に停止させるものである．これらの機体重心及び ZMP の予測は，操作入力に対する油圧アクチュエータの速度応答を 2 次遅れ系として近似した簡易なモデルを用いた．

これらの提案手法を実装し，模型車両による実験を通して提案した転倒防止制御の効果を確認した．転倒の危険がある状況を模擬した傾斜面での実験において, 転倒防止制御なしの条件では，模型車両が転倒もしくは不安定な状態に陥ったが，転倒防止制御ありの条件では, 機体が安定な状態に保たれることが確認できた．

今後は，実機の油圧ショベルの動作特性を計測し，提案する機体重心及び ZMP 予測手法を実機に適用した際の



(a) Without automatic stop

(b) With automatic stop when floor projection of CoG exceed±124 mm

(c) With proposed automatic stop（ZMP safety area：±124 mm，CoG safety area：±120 mm）

Fig. 22 Experimental appearance of automatic stop.

機体重心及び ZMP の予測精度についての評価を行い，提案する転倒防止制御の実機への適用可能性を検討する．また，油圧ショベルのシミュレータを構築し，網羅的な条件で実験を行うことにより本手法が操作性に与える影響や適用可能範囲の限界を検証する．本稿では，バケット内に積載物がない場合についての検討を行ったが，バケット内に積載物がある場合についてはバケット内重量を考慮する必要があるため，バケット内重量の計測手法について検討する必要がある．さらに，転倒防止制御を実機に搭載するために不可欠な要素である複数関節を同時に動かす複合動作への対応やバケットが地面に接触する場合への対応についても検討する．

文　　献

Coppelia Robotics, V-REP, available from < http://www.coppeliarobotics.com >, (参照日 2017 年 2 月 3 日).

羽多野正俊, 小原治樹, 抗力規範による移動マニピュレータの転倒安定性判別と安定化運動の実機による検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.703 (2005), pp. 928–935.

林宏樹, 田村隆幸, 三鬼尚臣, 無人化施工における通信遅延と通信周期が施工効率に与える影響の分析と改善提案, 平成 21 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, No.23 (2009), pp.119–124.

黄強, 菅野重樹, 加藤一郎, ヴィークル搭載型マニピュレータの安定化制御-安定規範とマニピュレータによる補償運動-, 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No.7 (1995), pp. 861–870.

倉鋪圭太, 井上雄仁, 深野亮, 吉灘裕, 実機特性を付与した建設機械模型の研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集 (2013), 1A1-Q14.

MathWorks, Matlab/Simulink Simscape Fluids, available from < https://jp.mathworks.com/products/simhydraulics.html >, (参照日 2017 年 2 月 3 日).

水落麻里子, 石井啓範, 山口仁一, 建設機械における動的安定性計測システムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会予稿集 (2010), 1A1-B15.

水落麻里子, 石井啓範, 山口仁一, 作業機械, WO2012/169531 (2012).

新田恭士, 災害復旧に貢献する無人化施工技術, 土木技術, Vol.67, No.4 (2012), pp.16–23.

Open Source Robotics Foundation, Gazebo, available from < http://gazebosim.org >, (参照日 2017 年 2 月 3 日).

Rey, A. D. and Papadopoulos, G. E., On-line automatic tipover prevention for mobile manipulators, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(1997), pp.1273–1278.

Vukobratovic, M. and Juricic, D., Contribution to the synthesis of biped gait, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 16, No. 1 (1969), pp. 1–6.

Yu, B., Park, K., Lee, K. and Han, C., Static compensation ZMP algorithm preventing tips-over of a tele operation

excavator, Proceedings of the 29th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (2012), pp. 652–659.

Zhao, D., Xia, Y., Yamada, H. and Muto, T., Presentation of realistic motion to the operator in a tele-operated construction robot, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.2 (2002), pp.98–104.

References

Coppelia Robotics, V-REP, available from < http://www.coppeliarobotics.com >, (accessed on 3 February, 2017).

Hatano, M. and Obara, H., Experiments of stability evaluation for mobile manipulators using criteria based on reaction and stabilization motion, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, Vol.71, No.703 (2005), pp. 928–935(in Japanese).

Hayashi, K., Tamura, T. and Miki, H., Effects of network delay and period on wok efficiency in unmanned construction and method for improving efficiency, Symposium on construction machinery and methods, No.23 (2009), pp.119-124 (in Japanese).

Huang, Q., Sugano, S. and Kato, I., Stability control for a vehicle-mounted manipulator-stability evaluation criteria and manipulator compensatory motion -, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 31, No.7 (1995), pp. 861–870 (in Japanese).

Kurashiki, K., Inoue, T., Fukano, R. and Yoshinada, H., Miniature construction machinery with real machine motion characteristics, Proceedings of JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2013), 1A1-Q14 (in Japanese).

MathWorks, Matlab/Simulink Simscape Fluids,
available from < https://jp.mathworks.com/products/simhydraulics.html >, (accessed on 3 February, 2017).

Mizuochi, M., Ihishii, I. and Yamaguchi, J., Development of dynamic stability measurement system for construction machinery, Proceedings of JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2010), 1A1-B15 (in Japanese).

Mizuochi, M., Ihishii, I. and Yamaguchi, J., OPERATION MACHINE, WO2012/169531(2012).

Nitta, Y. , Evolution of unmanned construction system playing important role in the disaster recovery, Civil engineering, Vol. 67, No. 4 (2012), pp. 16–23 (in Japanese).

Open Source Robotics Foundation, Gazebo, available from < http://gazebosim.org >, (accessed on 3 February, 2017).

Rey, A. D. and Papadopoulos, G. E., On-line automatic tipover prevention for mobile manipulators, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(1997), pp.1273–1278.

Vukobratovic, M. and Juricic, D., Contribution to the synthesis of biped gait, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 16, No. 1 (1969), pp. 1–6.

Yu, B., Park, K., Lee, K. and Han, C., Static compensation ZMP algorithm preventing tips-over of a tele operation excavator, Proceedings of the 29th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (2012), pp. 652–659.

Zhao, D., Xia, Y., Yamada, H. and Muto, T., Presentation of realistic motion to the operator in a tele-operated construction robot, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.14, No.2 (2002), pp.98–104.