

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K16069

研究課題名(和文) 内力アクチュエータを用いた転倒速度抑制によるヒューマノイドの躓きからの転倒回避

研究課題名(英文) Fall Avoidance for Humanoid Robot when Stumbling by Reducing Velocity of Fall with Internal Force Actuator

研究代表者

菅井 文仁 (Sugai, Fumihito)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号：30739256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、衝撃吸収による対策よりも破損リスクが低く、かつ大きな外乱に対応可能な足の踏み出しによるヒューマノイドロボットの転倒回避手法に注目し、その適用範囲拡大を目指す。歩行中に躓いた時のようにロボットが速度を持った状態での転倒に対して、コントロールモーメントジャイロ(CMG)を用いることで転倒速度を抑制し、足の踏み出し動作を行う時間余裕を拡大することを目的に研究を行った。具体的には、CMGの配置方法、アンローディング手法、CMGを用いた姿勢制御に関して研究を行いCMGを用いて転倒を抑制可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focused on the method of avoiding falls for humanoid robot by stepping which is less risk of damage and can cope with large disturbance than the method by shock absorbing when the robot falls down, and aimed to expand its application range. In order to prevent overturning the robot with the speed as if it got stumble in walking, we proposed the method which reduces the falling speed and expands a time margin for performing the foot stepping motion by using a control moment gyro (CMG). Specifically, we studied about a CMG placement method, an unloading method, an attitude control with using a CMG, and confirmed that it is possible to suppress falls with using a CMG.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ヒューマノイド 転倒回避 CMG

1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドロボットは人間と近い幾何形状を有しているため、人が使う環境・道具に対しての親和性が高いという特徴を有する。人と同等あるいはそれ以上の運動能力を獲得することで、ヒューマノイドを生活支援や災害対応などへ用いることが期待される。このような観点から、ヒューマノイドの適用範囲拡大を目指す上で、人と同等の歩行能力を獲得し、人の立ち入る範囲を移動出来ることは不可欠な要素である。しかし、二足歩行は本質的に不安定な運動であり、転倒によりロボットが破損する危険性がある。そのため、これまでにヒューマノイドの転倒による破損を回避するために様々な手法が研究されている。これらの手法は大きく分けると3つの手法に分類される。

歩行時の外乱に堅牢な制御を行う手法

転倒しそうになった時に足を数歩踏み出して転倒を回避する手法

転倒時の着地点を制御したり衝撃を吸収する外装を付加し、転倒時の衝撃を吸収する手法

の歩行時の外乱に対して安定化する手法では、大きな外乱が加わった場合には転倒を回避出来ない。また、の転倒時の衝撃を吸収する手法は、完全に衝撃を吸収できるとは言えずロボットが破損するリスクがゼロとは言えない。そこで、本研究では大きな外乱に対処可能でかつ転倒よりも破損リスクの低い、の踏み出しによる転倒回避手法に着目した。

踏み出しによる転倒回避においては、浦田らが転倒を回避するための踏み出しパターンの高速演算と高瞬発力を備えた水冷アクチュエータを用いることで、踏み出しによる転倒回避が可能であることを示した[1]。この時、足の踏み出しパターンの最適化計算は1 [ms]で完了しているが、1歩目の踏み出しが完了するまでに250 [ms]かかっている。したがって、歩行中に障害物で躓いた時のように運動量を持った状態での転倒回避は時間制約がより厳しく転倒回避が困難になる。加えて、脚のみの運動ではヨー軸周りに発生可能な力が小さく転倒回避が困難である。ヨー軸モーメントの補償に関しては以前から研究がなされており、上半身の腕振り動作や腰のひねりによってこの問題が解決出来ることを山口らは指摘しており、上半身運動の代わりに20[kg]の重りを振ることで、上半身の運動による効果を検証している。しかし、上半身の運動のみで補償を行うことを考えると上半身の可動範囲や環境との接触が問題となる。

参考文献

[1] 浦田 順一, 中西 雄飛, 岡田 慧, 稲葉 雅幸: 高速・高トルク動作のための大出力2脚ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 91-97, 2010.

[2] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎: 上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4, pp. 581-586, 1993.

2. 研究の目的

本研究では、衝撃吸収による対策よりも破損リスクが低く、かつ大きな外乱に対応可能な足の踏み出しによる転倒回避手法に注目し、その適用範囲拡大を目指す。具体的には、歩行中に躓いた時のようにロボットが速度を持った状態での転倒に対して、コントロールモーメントジャイロ(CMG)を用いることで転倒速度を抑制し、足の踏み出し動作を行う時間余裕を拡大する手法を研究する。

3. 研究の方法

本研究では、人工衛星の姿勢制御装置として一般的に用いられているCMGをヒューマノイドロボットに適用する。CMGはジンバルで支持された高速で回転する回転体の向きを変化させることで、その角運動量の変化に応じた力を発生する装置であり、小型な装置であるため上半身を動かす方法と比較して、環境との接触が問題にならない。また、小型でありながら大きなトルクを発生可能な装置である。

CMGの配置方法に関しては宇宙機分野での研究成果を参考にしつつヒューマノイドロボットへ搭載することを考慮して決定した。また、CMGの制御手法に関しては図1に示すように産業技術総合研究所において開発されたシミュレータChoreonoidにCMGを搭載したヒューマノイドロボットのモデルを構築し実機実験の前に検討を行った。CMGはジンバルで支持された回転体の向きを変えることでトルクを得ているため、CMGで吸収できる運動量には限界がある。そのため、宇宙機ではCMGが吸収できる運動量が限界に達した時に、ガスジェットスラスタを用いてその運動量の放出(アンローディング)を行う。ヒューマノイドの場合には床から反力を受けることが出来るためアンローディングを行うためにガスジェットスラスタを用いる必要はないが、どのようにアンローディングを行うかの戦略を明らかにした。

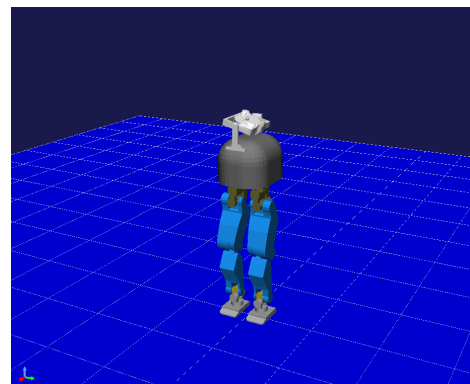


図1 CMG搭載状態でのシミュレーション

4. 研究成果

CMGが発生するトルクは図2に示すような1軸ジンバルを有するモデルの場合には下式で表される。

$$\begin{cases} \tau_x = 0 \\ \tau_y = J\omega\dot{\theta} \cos\theta \\ \tau_z = J\omega\dot{\theta} \sin\theta \end{cases}$$

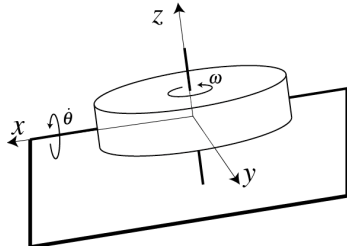


図2 1軸ジンバルCMGモデル

この式から、y軸にトルクを発生させる際z軸にもトルクが発生する。ヒューマノイドロボットの転倒を抑制するという目的から、ロール軸方向とピッチ軸方向のトルクを発生させることを考えた際には1軸ジンバルのCMGを3台各軸に搭載することが考えられるが、重量増加や設置スペースの観点から2軸ジンバルを有するデュアルジンバルコントロールモーメントジャイロ(DCMG)を採用した。上述の通り、ロール軸やピッチ軸へのトルクを発生する際にヨー軸方向へのトルクが発生してしまうが、ヨー軸方向へのトルクが問題となった場合にはDCMGを2台搭載することで、解決可能であるから性能評価のために1台のDCMGをロボットへ搭載し評価を行った。図3に開発したDCMGの外観を示す。

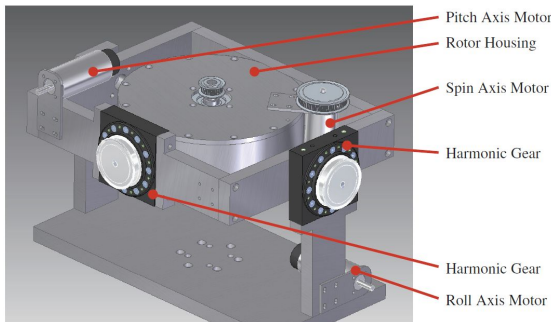


図3 開発したDCMG

実際に開発したDCMGを図4に示すように大出力脚型ロボットへと搭載し、設計通りのトルクが発生可能であることの確認を行った。直立状態のロボットに対して、CMGより最大トルクを発生する指令を与えZMPの変位を測定したところ、ピッチ軸方向に目標最大トルク35[Nm]とした時に最大ZMPの変位が67[mm]となった。一方で、図2のモデルからも分かるようにCMGはジンバル角度が90度になると、それ以上出力を発揮できなくなる。そのため、CMGに吸収した運動量を外力を用

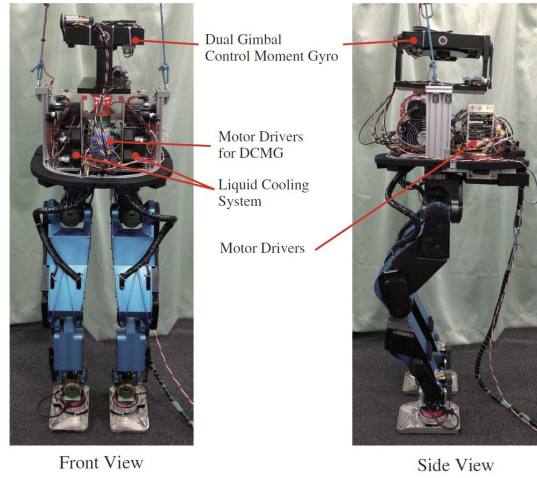


図4 DCMG搭載大出力脚型ロボット

いてアンローディングする必要がある。ヒューマノイドロボットの場合には宇宙機と異なり重力環境下で活動するため、重力を外力としてアンローディングが可能である。ロボットの姿勢が目標姿勢に近い際にジンバルを初期姿勢に戻す方向に動かすことでアンローディングし、CMGが吸収可能な運動量が飽和することを防ぐことが可能であることを確認した。

次に転倒抑制にCMGを利用することが可能であることを確認した。転倒を抑制することは直立状態の姿勢を保つことになる。図5に示すようなアルミのアンクル材の角にロボットを立たせてDCMGにより姿勢を保つことが可能であることを確認した。DCMGの出力トルクはロボットが直立状態を維持するように制御した。これにより、DCMGによる制御が無い状態では姿勢の維持が不可能であったものが、300[s]程度姿勢を保つことが可能となった。図6に実験時のロボットの姿勢とDCMGのジンバル角を示す。これは、転倒直前の200[s]のデータを示したもので、300[s]においてジンバル角度が可動範囲限界に達したため、CMGが吸収可能な運動量が飽和し、姿勢を保つことが出来なくなり転倒している。平らな床面に直立している場合には、上述のアンローディング手法によりCMGが吸収可能な運動量が飽和することを防ぐことが可能であるが、図5のように足平でモーメントを発生できない場合には有効ではない。そこで、ジンバル角度が可動範囲限界に近づ

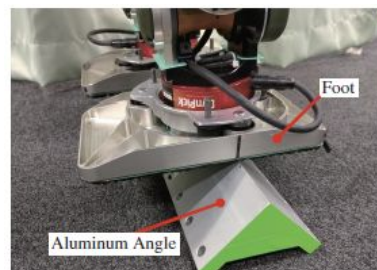


図5 姿勢制御実験

いた場合には、ジンバル角度が初期角度に近づく方向にロボットの姿勢を変化させることで、重力によりロボットを転倒させる方向に働くモーメントを外力としてアンローディングする手法をとっている。図6の260 [s]付近では、ジンバル角度が可動範囲限界に近づいたため、ロボットの目標姿勢をジンバル角度が0度に近づく方向に変化させることで、CMGの運動量を放出している様子が確認できる。

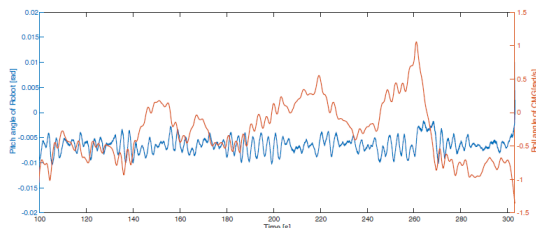


図6 姿勢制御実験結果

以上の結果から、CMGによりロボットの転倒を抑制することが可能であることが確認できた。しかし、1台のDCMGのみでは直立状態で摩擦の大きい路面においては問題がないが、そうでない場合にはロール軸やピッチ軸方向にトルクを発生した際にヨー軸に回転してしまうことが確認された。そこで、2台のDCMGを搭載するための試作を行い、回転体の回転方向を互いに反対にすることで、任意の方向にトルクが発生可能であるという見通しを得ることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計1件)

(1) 菅井文仁、小島邦生、野沢峻一、垣内洋平、岡田慧、稲葉雅幸、ダブルジンバルコントロールモーメントジャイロによるヒューマノイドロボットの姿勢制御、第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、2017

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅井 文仁 (SUGAI, Fumihito)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号：30739256