

生活支援ロボットを用いた水をこぼさずに運ぶ動作の開発

Development of Motion to Carry Water without Spilling using a Life Support Robot

知能機械工学コース

知能ロボティクス研究室 豊岡 晃次

1 緒言

超高齢化により要介護人口は増加し、また少子化による介護人材は不足している。特に在宅介護は大きな負担となるため、負担の軽減が強く求められている⁽¹⁾。

本報告では、上半身人型介護支援ロボットが水を安定に運ぶために、7自由度のアームによる抑制動作に適切な速度・加速度の計画法を提案する。最後に算出した波形データを協働ロボットの主要国際規格に基づく安全速度⁽²⁾心理物理学の研究⁽³⁾を基に提案手法の実用性を示す。

2 単体多機能な生活支援ロボット

本報告で使用する生活支援ロボットの外観を図1に示す。ロボットアームは7自由度あり、可動域の範囲で人に近い動作を再現できる。また下半身にはオムニホイールが搭載されており、平面において任意の方向に移動が可能である。

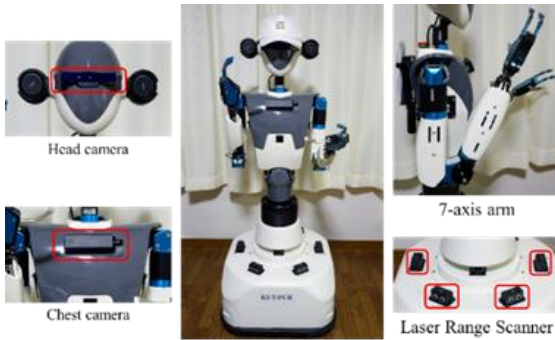


Fig. 1 KUT-PCR.

3 線形スロッシング理論

3.1 線形スロッシング理論に基づく運動方程式

線形スロッシング理論⁽⁴⁾に基づく運動方程式は、急停止時のコップへの入力による水の等価傾斜変位の時間変化 $h_{wave}(t)[m]$ を算出する式である。運動方程式を式 (1)、固有角周波数 ω_1 を式 (2)、液面半径 $R[m]$ を式 (3) に示す。

$$\ddot{h}_{wave}(t) + 2\zeta\omega_1\dot{h}_{wave}(t) + \omega_1^2 h_{wave}(t) = -a(t) \quad (1)$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{gk_1}{R} \tanh\left(\frac{h_0 k_1}{R}\right)} \quad (2)$$

$$R = R_{bottom} + \frac{h_0(R_{top} - R_{bottom})}{H} \quad (3)$$

$h_{wave}[m]$: Equivalent tilt displacement over time

ζ : Damping coefficient

ω_1 : Natural angular frequency

$g[m/s^2]$: Gravitational acceleration

k_1 : Dimensionless constant of the first mode

$H[m]$: Cup height

$h_0[m]$: Still water depth

$R[m]$: Liquid surface radius

$R_{top}[m]$: Cup opening radius

$R_{bottom}[m]$: Cup base radius

3.2 運動方程式の入力

運動方程式の右辺の入力は、急停止時の加速度 $a_{base}(t)$ に、急停止によるジャーク $j_{stop}(t)$ とロボットの上半身のピッチ回転 $a_{rot}(t)$ が加わる。並進加速度が振幅に変換される効率 α 、加速度の立ち上がり振幅に変換される効率 β を用いて入力 $a(t)$ を式 (4)、コップに対する加速度 $a_{stop}(t)$ を式 (5)、姿勢制御剛性および機械構造特性を含む無次元の経験係数 γ を用いてピッチ回転 $a_{rot}(t)$ を式 (6)、急停止時の加速度 $a_{base}(t)$ を式 (7)、ジャーク $j_{stop}(t)$ を式 (8) に示す。

$$a(t) = -\alpha a_{stop}(t) - \beta j_{stop}(t) \quad (4)$$

$$a_{stop}(t) = a_{base}(t) - a_{rot}(t) \quad (5)$$

$$a_{rot}(t) = \gamma z_{cup} \frac{a_{base}(t)}{h_{rcog}} \quad (6)$$

$$a_{base}(t) = -\frac{\pi v_0}{2T_s} \sin\left(\frac{\pi t}{T_s}\right) \quad (7)$$

$$j_{stop}(t) = \dot{a}_{stop}(t) \quad (8)$$

z_{cup} : Height from the ground to the cup

h_{rcog} : Robot center of gravity height

3.3 等価傾斜変位の離散データから加速度を逆算する式

この式は、等価傾斜変位の離散データからロボットアームの速度制御に必要な速度データを算出する式である。このとき急停止時に発生する波の波高データを逆位相にしたものが入力になる。また、等価傾斜変位は離散データであるため平滑化を行っている。平滑化した後の逆算の方程式を式 (9) に示す。

$$a_{theory}[k] = \ddot{h}_{wave}[k] + 2\zeta\omega_1\dot{h}_{wave}[k] + \omega_1^2 h_s[k] \quad (9)$$

$$\dot{h}_{wave}[k] = \frac{h_s[k+1] - h_s[k-1]}{2\Delta t} \quad (10)$$

$$\ddot{h}_{wave}[k] = \frac{h_s[k+1] - 2h_s[k] + h_s[k-1]}{\Delta t^2} \quad (11)$$

このままの加速度では2階微分を含み、高周波成分が強調され、ジャークが理論上最大になる。よって、一次遅れ系を採用し、ジャークを制限可能にし、位相遅れを最小にする。一次遅れ系を適用したものを式 (11)、これを $a_{arm}(t)$ について解いたものを式 (12) に示す。

$$\alpha a_{arm}(t) + \beta a_{arm}(t) = a_{theory}(t) \quad (11)$$

$$a_{arm}(t) = \frac{1}{\beta} \int_0^t e^{-\frac{\alpha}{\beta}(t-\tau)} a_{theory}(\tau) d\tau \quad (12)$$

この式 (12) を積分することで速度 $v_{arm}(t)[m/s]$ が算出可能である。

4 評価基準

主要国際規格-ISO/TS 15066 に基づき協調作業では安全力要件を満たすために0.25[m/s]以下の速度が推奨されている。また、加速度については心理物理学の研究によって一般に

0.5~2.0[m/s²]の範囲で心理的に識別可能である。今回は要介護者を対象とするため識別値が大きくなるが、逆に小さな加速度でも不安に感じてしまう。よって、ロボットが介護者との生活を前提に最大加速度0.5[m/s²]として評価する。

5 急停止時に発生する波のシミュレーション

5.1 シミュレーション条件

下半身の四輪オムニホイールの急停止時に発生する波を可視化し、各停止時間における波高の時間変化を検証するためシミュレーションを行った。指定した停止時間によって発生する波高の時間変化を確認する。1.0[m/s]で走行するロボットに対し、停止時間 $T_s[s]$ を0.1[s]から0.3[s]まで0.05[s]ごとに設定し、急停止時の波高を求めた。地面からコップまでの高さは0.825[m]であり、使用したコップは高さが0.1[m]、開口部の半径が0.1[m]、底の半径が0.025[m]であり、水が0.09[m]入っている。また、波高がプラスになるとコップの前方の壁に、マイナスになるとコップの後方の壁にそれぞれ波がせり上がっていることを示している。算出に使用した仮定や経験則により設定したパラメータは減衰係数 $\zeta = 0.025$ 、並進加速度が振幅に変換される効率 $\alpha = 0.25$ 、加速度の立ち上がりが振幅に変換される効率 $\beta = 0.05$ 、姿勢制御剛性および機械構造特性を含む無次元の経験係数 $\gamma = 0.3$ 、ロボットの重心高さ $h_{rcog} = 0.60[m]$ である。

5.2 シミュレーション結果

式(1)~(8)までを用いて急停止時に発生する波の等価傾斜変位を求めるシミュレーションを行った。シミュレーション結果の一部を例として図2に示す。図2より停止時間 $T_s[s]$ が短いほど振幅が大きく周期が短い。また、最初に波高がマイナスになることで急停止の瞬間、まずコップの後方の壁に波がせり上がることが判る。

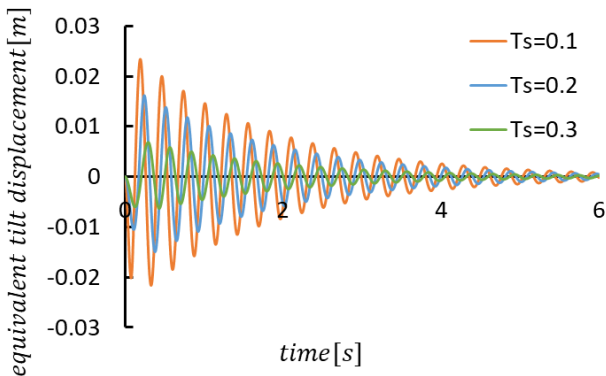


Fig.2 Time change in wave height at each stop time

6 ロボットアームの速度・加速度のシミュレーション

6.1 シミュレーション条件

四輪オムニホイールの急停止時に発生する波を抑制するために必要な7自由度のアームへの速度入力の実用性を検証するためシミュレーションを行った。指定した逆位相の波の再現率から加速度・速度の時間変化を確認する。各停止時間における波高データの逆位相の波を作り、再現率を25%、50%、75%、100%と変化させ、各再現率に対して逆スロッピング方程式を用いて、加速度・速度を算出する。逆算に使用した仮定や経験則により設定したパラメータは減衰係数 $\zeta = 0.025$ 、並進加速度が振幅に変換される効率 $\alpha = 2.0$ 、加速度の立ち上がりが振幅に変換される効率 $\beta = 0.01$ である。

6.2 シミュレーション結果

式(9)~(12)を用いて等価傾斜変位の波形データを逆位相にした離散データから抑制動作に適切な速度・加速度の逆算のシミュレーションを行った。シミュレーション結果の停止時間 $T_s[s] = 2$ を例として図3、4に示す。図3、4より図2の $T_s[s] = 2$ のグラフの逆位相のグラフを100%再現するには、加速度が最大約2[m/s²]、速度の絶対値が最大約0.05[m/s]必要だということが判る。

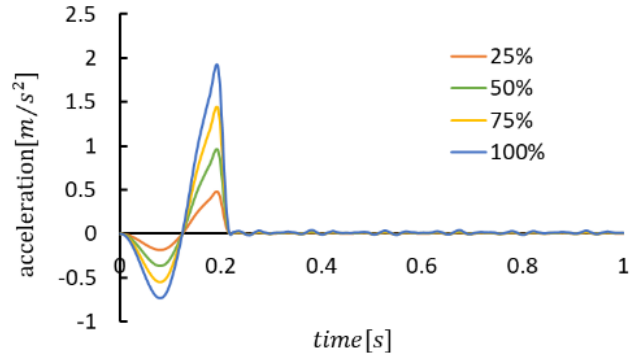


Fig.3 Change in acceleration over time

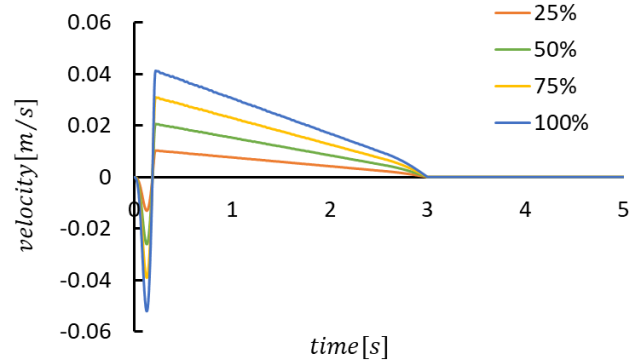


Fig.4 Change in velocity over time

7 結言

本報告では、簡易モデルを使ったシミュレーションにより生活支援ロボットの急停止時に発生する波を抑制するのに必要なロボットアームの速度・加速度の算出を行った。評価基準により停止時間 $T_s[s] = 2$ において25%の波の抑制が可能である。しかし $T_s[s] = 2$ の最大波高が0.015[m]以上であることから、 $T_s[s] = 2$ による急停止では評価基準での抑制動作は困難であることが確認できた。また図4よりロボットアームは、一瞬ロボットの体側に動いた後滑らかに前進し、停止するという動作を表しているため、急に飛び出すという印象を要介護者に与えずらいことから、現状の評価基準では要介護者の存在する空間での協働動作の評価が困難であると判った。

参考文献

- (1) 厚生労働省「介護保険事業状況報告(令和6年4月分)」
- (2) Granta Automation, "How Fast Can My Cobot Run Without Guarding?", Granta Automation, Jun. 2025
- (3) Amir R. Naseri and Peter R. Grant, "Human discrimination of translational accelerations", Experimental Brain Research, vol. 218, pp. 455-464, Feb. 2012. <https://link.springer.com/journal/221/volumes-and-issues/218-3?IFA>
- (4) Ibrahim, R. A. "Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications" Cambridge Univ. Press, 2005 Chapter 2: Linear Forced Sloshing. pp. 100-101