

遠隔操作における伝送遅延を考慮した移動ロボット制御

大垣 史迅[†]

鈴木 健嗣[‡]

筑波大学第三学群工学システム学類[†]

筑波大学システム情報工学研究科[‡]

1. はじめに

近年通信ネットワークとロボット技術の発展を背景として、ロボットの遠隔操作に関する要求が高まっている。しかしながら、操作者が移動ロボットに搭載したカメラ画像を見ながら遠隔操作を行う場面では、情報伝送路の状態により、しばしばデータ通信時に伝送遅延又は通信の切断が起こる。このことはロボットの遠隔操作を非常に困難にさせ、場合によっては操作不可能となる場合も生じる。

そこで本研究では、無線 LAN を使用した屋内での小型移動ロボットの遠隔操作において生じる伝送遅延を考慮し、ロボットに搭載したカメラ画像を工夫して操作者に提示することで、人間がなるべく訓練の必要なく操作を可能とするシステムの提案を行う。本手法は、移動ロボットの動作と操作者に提示する画像を同期させないことで時間遅延の回避を実現するものであり、これより伝送遅延の回避だけでなく、ロボットの遠隔操作を容易にさせることを示す。[1]

2. システム構成

本システムは大きく分けて移動ロボットと、操作者側 PC からなる。3 輪の移動機構、超音波センサを備えた移動ロボット上に全方位カメラ、ノート型 PC を搭載している。搭載した PC は、シリアル通信を通じて移動ロボットの制御とセンサ情報の取得を行う。また、操作者ができる限り直感的に操作できるようにハンドル型コントローラによって操作を行う。

3. 提案手法

3.1 伝送遅延

提案手法による遠隔操作においては、画像信号と操作量信号の各通信に伝送遅延が発生する。この遅延は伝送路の状況(アクセスポイントからの距離、障害物、スイッチングなど)によって不規則に変化し、場合によっては数秒単位で遅延が発生する。また、事前にこの遅延時間を知ることはできない。

3.2 伝送遅延を考慮しない遠隔操作

図 1 で示したシステムにおいて、移動ロボットから送られてきた画像をそのまま操作者に提示する。

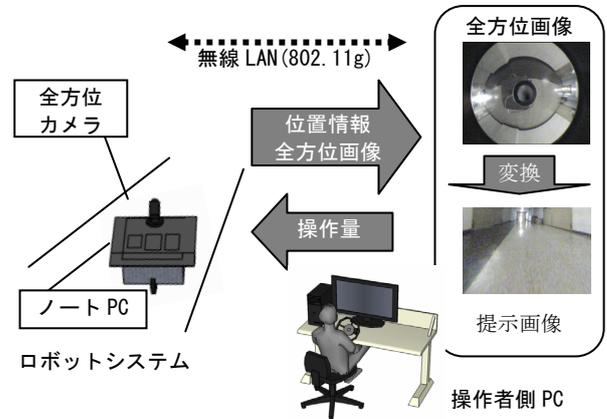


図 1 システム概略

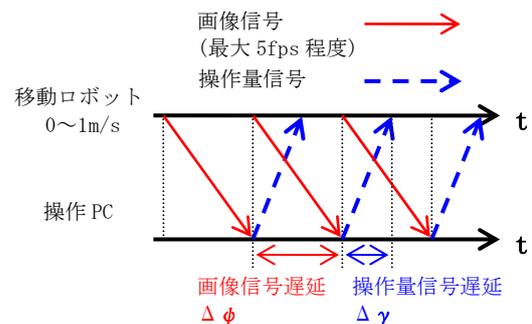


図 2 伝送遅延

また、操作量はそのまま移動ロボットへと送ることとする。

式(1, 2)に、時刻 t における操作者による操作量の積算値 $X_{pc}(t)$ と、ロボット位置 $X_R(t)$ が、以下の値を用いて定式化される。

$X_{pc}(t)$ は時刻 t における操作者が想定している現在位置と言い換えることもできる。

$$X_{PC}(t) = \int_0^t V_{PC}(\tau) d\tau + X_0 \quad (1)$$

$$X_R(t) = \int_0^{t-\Delta\phi_n} V_R(\tau) d\tau + \int_{t-\Delta\phi_n}^t C_n d\tau + X_0 + \int_{t-\Delta\phi_n}^{t-\Delta\phi_n+\Delta\gamma_{n-1}} C_{n-1} d\tau \quad (2)$$

$X_{PC}(t)$: 操作者操作量の積算値
 $V_{PC}(t)$: 操作者操作量
 X_0 : 初期値
 C_n : n 操作量信号
 $\Delta\phi_n$: n 画像信号の遅延
 $\Delta\gamma_n$: n 操作量信号の遅延
 $X_R(t)$: ロボット位置
 $V_R(t)$: ロボット動作量

移動ロボットが $X_R(t) = X_{pc}(t)$ となれば遠隔操作における伝送遅延の問題は発生しない。

A remote robot control under image transmission delay.

[†]Fumitoshi Ogaki, College of Engineering Systems, Third Cluster, University of Tsukuba.

[‡]Kenji Suzuki, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba.



図3. 全方位画像からの予測画像生成の概略

しかし、不規則に変動する $\Delta\phi_n$ と $\Delta\gamma_{n-1}$ が測定不可能なため上式の等号は成立しない。ロボットの速度が遅く遅延時間が小さいと仮定すれば近似できるが、ロボットの移動速度が速い、遅延時間が大きい、ロボットの現在位置の計測誤差の累積などにより、近似できなくなる。

3.3 時間遅れを考慮した遠隔操作

そこで本研究では、ロボットに先行させ、操作者の想定位置からある一定誤差範囲以内の画像を取得させる。以下がそれを数式化したものである。

$$X_{PC}(t) = X_R(t - \sum_{i=0}^s \Delta\phi_{n-i}) + L \quad (3)$$

$\Delta\phi_n$: 時刻 t の時の画信号像遅延

$s = 0, 1, 2, \dots, n$ L : 位置誤差 $0 \leq L \leq l$

しかしながら、ただ単純にロボットを先行させただけでは壁などの障害物に衝突してしまうため、超音波センサを使い、衝突を回避するなどの自律性を持たせている。

3.4 予測画像の作成

ロボットは全方位画像を取得するが、操作者にはその一部分のみを提示する。これは、式(3)の $X_{pc}(t)$ に相当する位置、方向から見えるであろう予測画像を生成するために、全方位画像から適切な画像を抽出し、さらに平行移動と拡大を行うことで提示画像を逐次作成する。[2]

大まかにいうと、直進方向は画像を拡大させることで、平行移動は画像の片側を狭め、反対側を広げることによって画像作成を行う。これによる変換可能な領域によって L の範囲を決定する。

3.5 現在位置誤差修正

ロボットの現在位置は車輪のオドメトリ情報によって求めているが、オドメトリの情報だけでは誤差が累積される。そこで、取得画像のパノラマ展開画像を用いて正規化相関により逐次的に移動量を計算することで回転方向の誤差修正を行う。

4. 実験

4.1 実験方法

本システムの有効性を検証するために実験を行った。実験方法は大学構内廊下において、初期位置から、目標地点(約 10m)までの往復させるように動作を行ってもらいとし、本システムを使用した場合と、伝送遅延を考慮していない遠隔操作

表1. 予測画像の有無による効果の比較

	平均到達時間	平均失敗回数
予測画像なし	2:04	1.75
予測画像あり	1:41	0

での比較を行った。被験者は4人である。壁への衝突は失敗とし、初めからやり直しを行った。

4.2 実験結果

今回の実験は到達時間だけでなく、失敗回数において大きな違いが出た。ロボットは最高速度 1m/s で動作させているが、予測画像なしの操作では、操作の困難さが顕著に現れた。このように、画像・操作信号に時間遅れがある場合では、ロボットによる高速走行は特に困難となり、多くの操作者は高速走行時操作に失敗した。そのため操作者は例外なく通常遠隔操作時はスピードを落として操作を行った。

一方、予測画像を提示した遠隔操作においては、画像の時間遅れによる操作性の低下がほとんどないだけでなく、ロボットによる自律的な障害物回避運動も加わるため、比較的問題なく操作を行うことができた。

5. まとめ

本稿では、無線 LAN を使用した小型移動ロボットの遠隔操作において、伝送遅延による画像・操作の時間遅れによる効果を低減するための手法を提案した。これら一連の実験より、想定どおり通常の遠隔操作は訓練を必要とし、操作中も常に緊張を強いられることが判明した。一方、提案システムでは、走行中を通じて十分に安定した操作が実現できることより、有用性を検証できた。

ここでは、無線 LAN による通信の長時間にわたる切断を想定していないが、無線 LAN で長距離の遠隔操作を行う場合、アクセスポイントのスイッチングなど通信の切断が起こる。提案手法は、これらの不規則な時間遅れにも対応するものであり、更に詳細で長距離環境での実験を行うことで、システムの有効性を検証する。

さらに、ロボットの進行方向の回転角度修正は、画像情報による移動量予測により行なっているが、これでは大まかな平行移動しかわからない。屋外での使用を想定して、画像の拡大縮小を含めた前後方向の修正を実現するために、現在オプティカルフローや SIFT 特徴量の利用を検討している。

6. 参考文献

- [1] 蒔田 考志, 鈴木 健嗣, 橋本 周司, インターネットを用いた遠隔操作型ロボット. 第 67 回情報処理学会全国大会, 3S-5 (2005)
- [2] 長原一, 浜田博昭, 八木康史, 谷内田正彦, 全方位視覚センサを用いた高解像度 3D モデリング, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No. SIG13 (CVIM 3), pp.90-98 (2001).