旋削加工における表面粗さの LQI 制御*

住 谷 秀 保** 青 島 伸 一*** 白 石 昌 武**

LQI Control of Surface Roughness in Turning

Hideyasu SUMIYA, Shin-ichi AOSHIMA and Masatake SHIRAISHI

The present contribution is an attempt of the optimal machine tool control in turning to follow a desired tool position with better surface finish characteristics. In order to evaluate surface finishes during machining, a new simple measuring system has been proposed which uses an optical parallel substrate based on a light reflection technique. A tool position control by the LQI control is designed to reduce the tracking error between the tool and the workpiece surface. For this aim, a compensatory flat tool attached to the specially designed tool servo system is compensated for so that the tracking errors in following a desired tool position are removed. The improvements in surface finish are clarified by the roughness measurement with a stylus instrument.

Key words: roughness measurement, optical parallel substrate, roughness control, LQI control, turning operation

1. 緒 言

半導体製造装置に始まった精密位置決め技術は、今やナノテクノロジーを経てオングストロームへと移行しつつある。工作機械の分野においても例外ではない。しかし加工分野の超精密位置決め技術が他の分野のそれと若干異なる点は、仕上げ面粗さや寸法などの製品の善し悪しとしてその結果が評価されることにある。つまりハードウェアとしての工作機械そのものを超精密化しても、最終的には工具－工作物間の相対運動精度が問題となり、その高精度化と高剛性化が要求される。それらが達成されて始めて超精密位置決め技術が活かされる。仕上げ面粗さを含む高精度化について制御の観点からすれば、次の 2 つの考え方が挙げられよう。

- (1) 工作物の状態（表面粗さ、寸法など）を直接または間接的にインプロセス計測し、それをフィードバック制御する方法^{1)~3)}。
 - (2) 位置決め系に種々の制御法を適用して（高精度化と同時に高剛性化をねらう場合もある）を行う方法⁴⁾⁵⁾。
- (1)については工作物の状態を直接制御するという点で理想的と言え、一方(2)の場合は一度ハードウェアを構成した後は、制御アルゴリズムというソフトウェアで対応し得る点に特徴がある。そこで本研究では制御系の構成にインプロセス計測用センサを使用しつつも、基本的には(2)の方法により旋削加工における工作物仕上げ面の向上を図ることを目的とした。具体的には、表面粗さ検出のため平行平板を用いた光反射法を提案し、それによって切削面の平均粗さに対応する粗さ $\bar{R}_a$ を測定する。この $\bar{R}_a$ 面に対し補正用の平バイトを DC サーボモータで駆動し、LQI (Linear Quadratic Integral) 制御するという方法である。従来表面粗さの改善法としては、切削速度や送りなどの加工条件を変えることが一般的に行われているが、本研究のような直

接制御によって粗さを平滑化するというアクティブな方法はほとんど例がない。なおこの報告は超精密を目標としたわけではないが、手法そのものは精密技術にも適用し得るものと考ええる。

2. 粗さ制御の考え方

図 1 の旋削加工面モデルに従い粗さの制御法を説明する。図では工作物を挟み通常の工具の相対する側に、補正用の平バイトが対向位置より切削開始点側に 3 mm ずらして装着される。

- 1) 切削開始点 A から約 3 mm 切削した時点で加工を中断し、その部分の $\bar{R}_a$ を後述する粗さ測定法で検出する。
- 2) 1)で測定された $\bar{R}_a$ 値と A 点での工作物仕上げ寸法面としての半径位置 D とから、 $[D + \bar{R}_a / 4]$ を初期基準位置とし、この面に対して補正用平バイトの初期位置決めを行い、加工を再開する。
- 3) 工作物長さ L を p 等分し、等分割された各切削部分 j ($j = 1, 2, 3, \dots, p$ で p はチャック側とする)の始めの 3 mm について同様に $\bar{R}_a$ を測定する。 D を一定として 3 mm 以降 $[D (\text{一定}) + j \bar{R}_a / 4]$ 面に沿って平バイトを追従させることにより、切削長さ L / p ごとの粗さの LQI 制御を行う。したがって 2)での初期基準位置とは、 $j = 1$ を意味する。

本方式については本来ならば加工中の寸法、つまり加工面の半径位置の情報を逐次得て粗さ制御しなければならない。一方後述の実験で用いた加工条件で制御無しのいくつかの切削を行った結果、いずれの場合もチャック側で工具摩耗によると思われる 20 μm 前後のプラスの半径誤差が生じており、かつ $\bar{R}_a$ の値もチャック側に向かって徐々に増加する傾向にあった（平均粗さで $R_a = 2.5 \mu\text{m}$ から数 μm ）。これらの結果を踏まえ、ここでは簡単のため D は一定として前述の制御アルゴリズムとした。図 1 の M-N 面は粗さ測定におけるレーザ照射面を表す。なお平バイトを用いた理由は以下による。周知のごとく旋削加工面の最大粗さ R_{max} は、理論的には

$$R_{\text{max}} = \frac{f^2}{8R} \quad (1)$$

* 原稿受付 平成 10 年 3 月 6 日

** 正 会 員 茨城大学工学部 (日立市中成沢町 4-12-1)

*** 茨城大学工学部

Fig. 1 Model of a turned surface

で表される。ここに f は送り、 R は工具のノーズ半径である。したがって $R \rightarrow \infty$ であれば最大粗さは理論的にゼロとなり、平バイトがこの場合に相当する。粗さについては局所的に大きな山と谷の部分を除けば、本測定での $\bar{R}_a$ の大小は R_{ms} や R_{max} のそれにある程度対応する。また平バイトによる切削では切削抵抗が大きくなるが、本研究のように粗さを平滑化するという目的においては、その使用法による問題は生じない。このような観点から粗さの補正制御に平バイトを用いた。

3. 粗さ測定法

光反射法に基づく表面粗さ測定は非接触法として最も簡単な粗さの評価法であり、従来からしばしば用いられている。しかしこの方法は必ずしも測定感度が高いわけではない⁶⁾。そこでこの欠点を改善すべく、光反射法に平行平板を適用して粗さの測定を行う。

3.1 粗さ測定系と旋削加工面からの反射

図2に表面粗さ測定の構成を示す。波長 680 nm の半導体レーザーからのレーザービーム（直径で 3.0 mm 程度に拡大）は、入射角 θ_1 の角度で工作物表面に照射される。工作物からの散乱光の一部を反射角 θ_2 で平行平板で捕らえ、と同時にその反射光を光センサ D で検出する。簡単のため、まず図2のように工作物からの反射光を D' の位置で検出することを考える。旋削加工面が送りマークで代表される一方向面と仮定し、それに Beckmann⁷⁾ の反射理論を適用すると、D' の位置での反射光強度 $I_o(\theta_1, \theta_2)$ は

Fig. 2 Measuring method of surface roughness

$$I_o(\theta_1, \theta_2) = \frac{\sqrt{\pi} F^2 T}{|v_z| \sigma} \exp\left(-\frac{v_z^2}{4v_z^2} \cdot \frac{T^2}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

ここに

$$F = \{1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)\} / \{\cos \theta_1 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)\}$$

$$v_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_1 - \sin \theta_2), \quad v_z = -\frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)$$

λ, σ はそれぞれ照射面長さ、レーザー光の波長、および工作物の R_{ms} 粗さを、また T は自己相関長を表す。

3.2 平行平板からの反射

平行平板（以下、平板と略記）を反射光が通過した場合の強度は以下のように求められる。図 3(a) は工作物からの反射光が平板に入射した場合の、表面及び底面からの反射モデルを示したものである。このとき表面からの反射強度 I_r は次のように表される⁸⁾。

$$I_r = \frac{E \sin^2 \frac{\delta}{2}}{1 + E \sin^2 \frac{\delta}{2}} I_o(\theta_1, \theta_2) \quad (3)$$

これより平板を介した旋削加工面からの反射光は式(2)を用いて

$$I_r = \frac{E \sin^2 \frac{\delta}{2}}{1 + E \sin^2 \frac{\delta}{2}} \frac{\sqrt{\pi} F^2 T}{|v_z| \sigma} \exp\left(-\frac{v_z^2}{4v_z^2} \cdot \frac{T^2}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

となる。ここに、 $E = \frac{4r^2}{(1-r^2)^2}$, $\delta = \frac{4\pi}{\lambda} (nd)$ 。

n, d は平板の屈折率と厚さを、 r は平板の上面と下面の振幅反射率を表す。

3.3 反射のシミュレーション

式(3)についてシミュレーション考察する。 m を整数とすると、 δ が $2m\pi$ つまり $d = 2\pi, 4\pi, \dots$ が一つの基準となるから、 $r = 0.65$ として式(3)から I_r / I_o の概形を描くと図 3(b) のようになる。具体的な計算例として、使用した平板の仕様から $n=1.5$, $d=1.0$ mm であるから、 $I_r / I_o \approx 0.53$ となる。つまり $I_r \leq I_o$ となって、

Fig. 3 Optical parallel substrate

反射光強度という点からは平面板を用いない方が測定上好ましい。一方図3(b)に示されるように、位相差 δ が $2m\pi$ から少しでもずれると I_0 に対して I_r は急激に減少する。位相差のずれは粗さの大小に関係するので、この急激な減少が粗さの測定ではあたかも測定感度を向上させるような特性を示すことが期待される。

平面板を使用しない場合(式(2))と使用した場合(式(4))のシミュレーション(最大値を1として規準化)、およびそれらの実験結果の例を図4に示す。実験は図2の構成に従い、あらかじめ触針式粗さ計での平均粗さが $Ra=0.1\sim 11.8\mu m$ に仕上げられた旋削面について行った。また各パラメータは $\theta_1=\theta_2=20^\circ$, $l=3.0\text{ mm}$, $\lambda=0.68\text{ mm}$, $T=2.5\mu m$ (代表値)とした。全体的に実験結果はシミュレーション結果と傾向がおおよそ一致している。また平面板を使用すると図のように測定感度が大きくなることが確かめられる。なお本光学的測定法での粗さを $\bar{Ra}$ と記述しているのは、レーザ光の $\phi 3.0\text{ mm}$ という大きさにより旋削面の平均的な粗さを捕らえてはいるものの、触針式粗さ計による平均粗さ Ra とは厳密に一致しないと考えられるので区別した。

Fig. 4 Measurement and simulation of surface roughness

4. 制御系の設計

基準面に対する補正用平バイトの追従位置制御を行うため、オブザーバ併用によるLQI制御系を設計する。

4.1 システムの記述

工作物径方向について、DCサーボモータで駆動される平バイトの位置決め系の伝達関数 $G(s)$ は、解析の結果サーボ増幅器の特性を含めて次式で表される。

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ka}{1+\tau s} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

ここに Ka , τ , ξ , ω_n はそれぞれサーボ増幅器のゲインと時定数、減衰係数、それに固有角周波数を表す。また $U(s)$ は基準入力としての平バイトの位置、出力 $Y(s)$ は実際の位置で、 s はラプラス変換を表す。式(5)において時間 ti ($i=1,2,\dots$)における状態変数、入力、出力をそれぞれ $X(i)=[x_1(i) \ x_2(i) \ x_3(i)]^T$ (‘は転置)、 $u(i)$, $y(i)$ とすると、その離散時間系の状態方程式は次式となる。

$$X(i+1) = \Phi X(i) + \Gamma u(i) \quad (6)$$

$$y(i) = CX(i) \quad (7)$$

ここに Φ, Γ, C は 3×3 , 3×1 , 1×3 の行列で、

$$\Phi = e^{-A\Delta}, \quad \Gamma = \left(\int_0^\Delta e^{-At} dt \right) B \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\omega_n^2}{\tau} & -\frac{2\xi\omega_n + \omega_n^2\tau}{\tau} & -\frac{1+2\xi\omega_n\tau}{\tau} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{Ka\omega_n^2}{\tau} \end{bmatrix}^T, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Δ はサンプリング時間を表す。

4.2 LQI制御系

平バイトを用いた本位置決め系は、操作量としての切込み量補正(ステップ入力)による制御法である。したがって内部モデル原理により位置偏差を除去するためには、1型の積分補償を行う必要がある。その場合の2次のオブザーバを併用したLQI制御による離散時間系状態変数線図を図5に示す。全体は位置決め系、積分制御、オブザーバ、それに最適レギュレータから構成されている。図中 Z は Z 変換のオペレータを表す。

Fig. 5 Overall state variable diagram of the tool servo system

2次元のオブザーバのダイナミクスは

$$\hat{X}(i-1) = \hat{D}W(i-1) + \hat{J}y(i-1) \quad (11)$$

$$W(i) = \hat{\Phi}W(i-1) + \hat{\Gamma}u(i-1) + \hat{G}y(i-1) \quad (12)$$

ここに $\hat{D}, \hat{J}, \hat{\Phi}, \hat{\Gamma}, \hat{G}$ は設計パラメータである。図5において制御則 $u(i)$ は、状態 $X(i)$ の推定値 $\hat{X}(i)$ を用いると次式となる。

$$u(i) = -F\hat{X}(i) + kz(i) \quad (13)$$

$$z(i) = z(i-1) + [V - y(i-1)] \\ = z(i-1) + \varepsilon \quad (14)$$

F は最適レギュレータにおける 1×3 のゲイン行列、 k はスカラーゲイン、 ε は位置偏差を表す。問題は ε を最小にするようにゲイン F , k を決定することであり、それは次の式(15)および式(16)のリカッティ方程式を解くことにより求められる⁹⁾。

$$\begin{bmatrix} F & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi - I_3 & \Gamma \\ C & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} g + \Gamma' P \Gamma \end{bmatrix}^{-1} \Gamma' P \Phi \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$P = Q + \Phi' P \Phi - \Phi' P \Gamma \begin{bmatrix} g + \Gamma' P \Gamma \end{bmatrix}^{-1} P' P \Phi \quad (16)$$

ここに I_3 は 3 次の単位行列, P はリカッティ方程式の解を表す正定対称行列, Q と g は最適レギュレータにおける重み行列と重み係数を表す。

さて $x_1(i)$ は工作物に対する平バイトの位置, つまり粗さの実測に基づく $[D + j \bar{R}a / 4]$ 面位置であり, 他の 2 つの状態変数は推定値 $\hat{x}_2(i)$, $\hat{x}_3(i)$ を用いるため 2 次元のオブザーバを適用する。制御の実施に当たっては演算による時間遅れのため, 制御対象への出力時より 1 サンプル前求めた状態変数 $\hat{X}(i-1)$ から制御則を算出しなければならない。したがって最終的に $u(i)$ は次のようになる。

$$u(i) = -F \Phi \hat{X}(i-1) - F \Gamma u(i-1) + k \sum_{j=0}^{i-1} \varepsilon(j) \quad (17)$$

ここに $\hat{X}(i) = [x_1(i) \ \hat{x}_2(i) \ \hat{x}_3(i)]'$ である。

4.3 制御シミュレーション

式(17)による制御の妥当性を調べるためシミュレーションを行った。式(5)の各パラメータについては解析およびステップ応答結果から, $Ka = 21.5$, $\tau = 0.04$ s, $\xi = 0.68$, $\omega_n = 87.1$ rad/s と得られた。サンプリング時間を $\Delta = 1$ ms とし, 代表的な次の(a), (b) 2 つの場合の重みの組合せについて, オブザーバの極を 0.510, 0.375, 0.438 (これらの値は予備実験をもとに決定した) に設定してステップ応答を求めた。

$$(a) \ Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (b) \ Q = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$g = 1.0$

式(15), (16)を解き, オブザーバを設計して得られた制御則は, (a), (b)それぞれの重みに対し次の通りである。

$$(a) \ u(i) = -6.566x_1(i) - 0.108\hat{x}_2(i) + 0.492\hat{x}_3(i) + 5.108z(i) \\ (b) \ u(i) = -3.761x_1(i) - 0.086\hat{x}_2(i) + 0.342\hat{x}_3(i) + 5.108z(i)$$

Fig. 6 Simulation result of a step response

図 6 に切込み量として, 半径位置 D から 1 mm のステップ入力を与えた場合の制御シミュレーション結果を示す。(a)のように重み行列の要素を大きくするとゲインが大きくなるため, それによって若干オーバーシュートは見られるものの応答は速くなる。しかし(a), (b)いずれの場合も定常位置偏差は残っておらず, シミュレーション上での制御の妥当性は確かめられる。

5. 実 験

5.1 実験装置

図 7 に小型旋盤を用いた実験装置全体の構成を示す。工作物を挟み工具台の反対側に X-Y の 2 軸駆動用精密ステージ (工作物径方向 Y の位置決め分解能が 0.1 μ m で, DC モータ駆動) を取り付け, その上に歯幅 4 mm の平バイトを装着した。このステージは工作物中心と工具の送り方向との平行度を確保するため使用したもので, 工具台の送りと同一速度で駆動できるように制御される。半導体レーザ装置に平面板を組み込んだ粗さ測定システムは同じく精密ステージに搭載され, 図 1 に示した 2 つの工具とレーザ照射位置との関係にあるように, 平バイトの切削位置より前方向に $\phi 3$ mm の大きさで照射した。レーザは測定中連続照射されるが, 3 mm ごとの工作物長手方向の粗さが評価できるよう, 通常の工具で 3 mm 切削した時点での瞬時の反射光のみをコンピュータで処理するようにした。また測定への切りくずの影響を除去するため, 測定面に約 200 kPa のエアジェットを吹き付けた。測定された粗さ信号は図 4 の特性に従い, 16 ビットのコンピュータで処理されて $\bar{R}a$ が求められる。

通常の工具には P40 を用い, 切削速度 70~100 m/min, 送り 0.1 mm/rev, 切込み量 0.8 mm とし, センタ支持された工作物 S45C (400 mm $\times$ ϕ 50 mm) の乾式切削に対して制御実験を行った。制御の妥当性を調べるため補正切削終了後, 触針式粗さ計にて実測した。制御のための各係数やパラメータは DSP を介しコンピュータで演算され, その結果得られた制御則は駆動用精密ステージに送られて, 工作物径方向の補正切削が実施される。なお前述したようにこの切削実験では, 工作物がチャック側に向かってプラスの寸法誤差を示した。

5.2 制御実験結果

仕上げ面の半径位置が $D = 24.0$ mm の工作物について, 切削開始点から 3 mm の部分の粗さが (1) $\bar{R}a = 4.8 \mu$ m (測定された

Fig. 7 Experimental setup

$R_{\max}$ は $10.6 \mu\text{m}$ の工作物で、 $[24.0 \text{ mm} + 1.2 \mu\text{m}]$ の面を初期基準位置とした場合、および (2) $\bar{R}a = 2.5 \mu\text{m}$ (同じく $R_{\max} = 6.2 \mu\text{m}$) の工作物で、 $[24.0 \text{ mm} + 0.6 \mu\text{m}]$ を初期基準位置とした場合について制御実験を行った。工作物長さ $L = 400 \text{ mm}$ を $p = 10$ 等分し、したがって 40 mm ごとの粗さ制御とした。制御則は図 6(a) の場合と同一とした。(1)および(2)の目標加工面に対し、切削終了後触針式粗さ計で測定した結果を図 8, 9 に示す。いずれも工作物中間位置 $j = 5$ の始めの 3 mm の一部で、図には比較のため制御を行わない場合の表面粗さも示してある。

まず図 8 は(1)の場合の結果で、(a)の制御を行った場合は粗さの山の部分が平バイトにより平滑化され、平たい形状に近い表面がいくつか見られる。制御により平滑化された部分の最大粗さを測定すると $R_{\max} = 4.5 \mu\text{m}$ となり、その部分が $\bar{R}a = 5.6 \mu\text{m}$ と得られていることから、両者は比較的近い値を示している。これに対し(b)の補正制御を行わない場合は、 $10.6 \mu\text{m}$ という初期位置での最大粗さが示すように全体的に複雑な粗さを呈している。次に図 9 (図 8 と縦方向のスケールが異なる) でも同じく平滑化による平らな表面が部分的に見られ (図 9 (a))、制御によって最大粗さは切削開始時のそれと比較して $3.4 \mu\text{m}$ 程度まで減少している。この場合も制御を行わなければ粗さの値は大きい。ただ加工面半径位置を一定とした制御アルゴリズムのた

め、寸法誤差が(1)の場合より小さく現れる(2)では、チャック側に近づくにつれ極端に言えば制御がかからないという状況が発生する (実際には若干の制御が行われてはいるが、その部分は $R_{\max} = 5.3 \mu\text{m}$ と図 9(a)の位置でのそれよりかなり大きくなっている)。

6. 結 言

旋削加工における表面粗さのアクティブ制御を行うため、レーザ光と平行平板を用いた光反射法により $\bar{R}a$ を測定した。本測定法は原理が極めて簡単で、測定感度が著しく改善された。この測定で得た切削開始点の $\bar{R}a$ の値と加工面半径位置との情報を基に平バイトの初期基準位置を設定した。以後等分割した各切削部分の始めの 3 mm について $\bar{R}a$ をインプロセス計測して、その面に平バイトを追従させることにより粗さを平滑化するようにした。具体的にはオブザーバを併用した LQI 制御系を設計し、通常の工具と対向する側に設置された 2 軸駆動用の精密ステージに平バイトを搭載して、工作物径方向の補正切削を実施した。その結果、平滑化後の最大粗さは制御前に比較して大きく減少しており、本手法の有効性が確かめられた。

工具摩耗のみならず、工具の熱膨張や切削抵抗による工作物の弾性変形等は直接工作物の寸法や表面の状態に影響することから、今後はそれらの情報を得た上で、つまり加工面の半径位置の情報をオンラインで検出しながら粗さ制御を行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) 宇田 豊、河野嗣男、矢澤孝哲：インプロセス計測加工精度補償の研究 (第 5 報) — 工具-変位計オフセット量の残留形状誤差への影響と補正制御できない特異点の除去対策 —, 精密工学会誌, **61**, 7 (1995) 976.
- 2) M. Shiraishi: Geometrical Adaptive Control in NC Turning Operation, Trans. ASME, J. Eng. Ind., **106**, 1 (1984) 75.
- 3) M. Shiraishi and S. Sato: Dimensional and Surface Roughness Controls in a Turning Operation, Trans. ASME, J. Eng. Ind., **112**, 1 (1990) 78.
- 4) 小林 功、沼里英彦：超精密位置決め用高減衰ステージ機構の開発, 精密工学会誌, **60**, 2 (1994) 201.
- 5) 進士忠彦、佐藤海二、下河辺 明：高精度磁気軸受の研究 (第 2 報) — オブザーバの変位推定限界とセンサレス高精度位置決め —, 精密工学会誌, **63**, 5 (1997) 694.
- 6) M. Shiraishi: A Consideration of Surface Roughness Measurement by Optical Method, Trans. ASME, J. Eng. Ind., **109**, 2 (1987) 100.
- 7) P. Beckmann and A. Spizzichino: The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces, Pergamon Press, Oxford, (1963).
- 8) 野田寿一：光計測技術とその応用, NTT 光エレクトロニクス研究所, (1994) 23.
- 9) 白石昌武：現代制御理論, 日刊工業新聞社, (1995) 109.

cutting speed: 95 m/min, feed rate: 0.1 mm/rev
depth of cut: 0.8 mm, workpiece: S45C

Fig. 8 Experimental result (1) at $\bar{R}a = 4.8 \mu\text{m}$

cutting condition: same to Fig. 8

Fig. 9 Experimental result (2) at $\bar{R}a = 2.5 \mu\text{m}$