

SOUBORNÝ REFERÁT

Fuzzy logika v anesteziologii jako způsob uvažování i nástroj pro praktické použití

Adamus M.¹, Bělohávek R.²

¹Klinika anesteziologie a resuscitace, LF Univerzity Palackého a Fakultní nemocnice, Olomouc

²Katedra informatiky, PřF Univerzity Palackého, Olomouc

Souhrn

Expertní znalosti v humanitních oborech jsou charakteristické svou nejistotou a neurčitostí. Údaje, se kterými expert (např. lékař) pracuje, jsou často nepřesné, nejisté a neurčité, ale právě podle takových informací se odborník musí rozhodovat. Zpracováním neurčitých a nejistých dat se zabývá tzv. fuzzy logika, která pracuje s fuzzy množinami. V celé řadě běžných situací a úloh, pro něž nemáme přesné matematické modely, je expert schopný svou znalost a správné řešící postupy formulovat v přirozeném jazyce, a to pomocí tzv. jestliže-pak pravidel. Na nich založené pravidlové fuzzy systémy představují matematický model, který vzniká přímo ze zkušenosti popsané příslušným odborníkem a v jeho přirozeném jazyce. Zároveň tak získáváme i způsob vyjadřování, kterému rozumí počítač a umí s ním pracovat. Fuzzy systémy se mohou uplatnit v celé řadě konkrétních situací z medicínské praxe, příkladem mohou být diagnostické expertní systémy nebo zpětnovazební fuzzy regulační zařízení.

Klíčová slova: fuzzy logika – neurčitost – jazykový popis – fuzzy regulace

Abstract

Fuzzy logic in anaesthesiology as a way of thinking and a tool for practical applications

Uncertainty and indeterminacy are typical of expert knowledge in humanities. Data processed by an expert (e. g. a medical doctor) are often imprecise, uncertain, and indeterminate. It is, however, these data according to which the expert has to make his/her decisions. Processing of indeterminate and uncertain data is the subject of fuzzy logic, which deals with fuzzy sets. In a broad variety of situations and tasks for which no precise mathematical models are available, an expert is able to formulate his/her knowledge and problem solving strategy in a natural language by means of so-called "if-then" rules. Rule-based fuzzy systems, which are based on these rules, represent a mathematical model that results directly from the expert's experience described in a natural language. In addition to that, fuzzy systems provide us with a means of communication easily usable and thus comprehensible by a computer. Fuzzy systems can be applied to a broad spectrum of situations in medicine, such as diagnostic expert systems and feedback fuzzy control devices.

Key words: fuzzy logic – indeterminacy – linguistic description – fuzzy control

Anest. intenziv. Med., 2006, 17, č. 5, s. 246–250.

Pojem nepřesnosti a neurčitosti v lékařství

V humanitních oborech hraje při získávání znalostí, nabývání zkušeností, formulaci postupů a interpretaci dat významnou úlohu člověk. Takto získané expertní znalosti, podklady (data, údaje) a postupy (pravidla) jsou charakteristické svou nejistotou a neurčitostí. Nejistota a neurčitost mají rozmanité podoby a projevují se v různých aspektech praktického života. Údaje, se kterými expert (lékař) pracuje, jsou často nepřesné – imprecise (v důsledku nepřesnosti při sběru dat, měření nebo dotazování), nejisté – uncertain (a tedy platné pouze v pravděpodobnostním smyslu) a neurčité – indeterminate (nejednoznačné, vágní). Právě podle takových informací se však odborník musí rozhodovat. Zároveň s rozhodováním na základě těchto údajů se expert současně i učí, tj. pozoruje různé zákonitosti, které je schopen ověřovat a sdělovat ve formě doporučení a pravidel ostatním.

Je jistě žádoucí, aby při zpracování a využívání dostupných údajů odborníkovi pomáhaly exaktní metody a praktické nástroje na nich založené. Neurčitost a nejistota byly dlouhou dobu považovány za element, který do exaktních metod nepatří. Podle tohoto východiska je třeba před použitím exaktních metod neurčitost a nejistotu z dat odstranit a teprve potom na takto „očistěná“, přesná, spolehlivá a jednoznačná data exaktní metody použít. Heisenbergův princip neurčitosti [1], známý z fyziky elementárních částic, však ukázal, že příroda je tak složitá, že tento postup je principiálně nepoužitelný. Nelze totiž současně exaktně stanovit všechny charakteristiky částice; chceme-li znát jednu charakteristiku přesně, bude naše znalost druhé charakteristiky nepřesná. Toto pravidlo se odráží v základech moderní fyziky (zejména kvantové), která je založena na pravděpodobnostních a statistických modelech. Ty možná

neposkytují tak elegantní a snadno interpretovatelné předpovědi jako modely klasické fyziky, ale oproti nim jsou prakticky použitelné i v situacích, kdy postupy klasické fyziky selhávají.

Tradičně studovaná neurčitost měla pravděpodobnostní povahu. Během druhé poloviny 20. století se však vyvíjely nové metody pro práci s neurčitými a nejistými daty a dosáhly praktického využití v řadě oblastí. Není náhodou, že několik Nobelových cen za ekonomii bylo uděleno právě za přínos k rozvoji těchto postupů. V lékařství jsou dnes již zcela běžně používány metody statistického vyhodnocování a popisu dat i metody statistické indukce, tj. usuzování ze vzorku dat na vlastnosti celé populace. Další zajímavou oblastí je použití tzv. expertních systémů. Expertní systém je počítačový program (software), který pomáhá odborníkovi při rozhodování. Obsahuje tzv. bázi znalostí (knowledge base), což je vhodným způsobem reprezentovaný soubor pravidel a doporučení, kterými se rozhodování v dané oblasti řídí. Odborník (lékař) dohodnutým způsobem popíše stav nemocného a konkrétní údaje k němu se vztahující (např. demografická a anamnestická data, klinický stav nemocného, výsledky laboratorních a paraklinických vyšetření atd.). Expertní systém pak na základě báze znalostí u tohoto nemocného jednak stanoví pravděpodobnou diagnózu a zároveň navrhne doporučení pro jeho léčbu i s vysvětlením a komentářem [2]. Řada expertních systémů dosáhla úrovně srovnatelné s konzultací skutečného lékaře-specialisty a je dnes používána v praxi. Jedním z nejznámějších je MYCIN [2], vyvinutý na Stanfordské univerzitě, který doporučuje způsob terapie infekčních nemocí. Je příkladem systému, který pracuje s nejistotou. Spolu s doporučením totiž stanovuje také tzv. faktor jistoty (certainty factor), který je pravděpodobnostní povahy a odráží spolehlivost navrhovaného doporučení.

V expertních znalostech je však často významně přítomen i odlišný typ neurčitosti, který pravděpodobnostní povahu nemá. Příkladem je tzv. vágnost (vagueness). Vágnost je charakteristickým rysem výrazů přirozeného jazyka – např. výrazy „obézní člověk“, „mělká anestezie“, „silně se zadýchává“ atd. patří mezi typické vágní pojmy. Jsou to výrazy, které běžně v životě používáme, intuitivně jim rozumíme a pomocí nichž formulujeme svá pozorování i znalosti. Matematickým modelováním reprezentace vágních výrazů a práce s nimi se zabývá tzv. fuzzy logika, která je jednou z nejmladších oblastí zpracování neurčitých a nejistých dat.

Fuzzy logika – motivace a základní principy

Fuzzy logika vznikla v 60. letech 20. století v pracích amerického inženýra a matematika Loftiho A. Zadeha [3]. Fuzzy znamená kudrnatý, chlupatý, mlhavý, rozmazaný, neostrý; první česky psané práce hovořily v této souvislosti o „mlhavých množinách“. Zadeh upozornil na fakt, že v celé řadě běžných situací a úloh, pro něž nemáme přesné matematické modely, je expert schopný svou znalost

a správné řešící postupy formulovat v přirozeném jazyce, a to pomocí tzv. „jestliže-pak“ pravidel. Příklady takových pravidel mohou být následující výroky:

- Jestliže při umělé plicní ventilaci EtCO_2 pomalu roste, pak pro dosažení normokapnie musím o něco zvýšit minutovou ventilaci.
- Jestliže je při umělé plicní ventilaci hodnota EtCO_2 lehce zvýšená, pak pro dosažení normálních hodnot p_aCO_2 musím na ventilátoru mírně zvýšit velikost dechového objemu (V_T) nebo dechové frekvence (f).
- Jestliže je při anestezii svalová relaxace nedostatečná, musím o něco zrychlit infuzi s kurarimimetikem.
- Jestliže je hloubka anestezie nedostatečná, pak nastavím odpařovač volatilního anestetika na vyšší hodnotu.
- Jestliže je arteriální tlak lehce zvýšený nad cílovou hodnotu, pak o něco zrychlím infuzi vazodilatátoru.

Člověk je schopen se těmito pravidly úspěšně řídit. Pravidla však obsahují vágní výrazy (pomalu roste, o něco zvýšit, vyšší hodnotu atd.), pro jejichž popis nebyl k dispozici vhodný matematický prostředek. Řešení, které se později osvědčilo, přinesl Zadehův pojem fuzzy množina. Obecně pod pojmem množina rozumíme soubor od ostatních entit rozeznatelných objektů, které mají určitou společnou vlastnost nebo vlastnosti, jimiž se od ostatních objektů odlišují.

Do klasické množiny daný prvek buď patří [1], nebo nepatří [0] – neexistuje jiná možnost jeho zařazení. Například určitý konkrétní pacient, trpící hypertenzí, patří do skupiny nemocných nazvané „hypertonicí“ a všichni ostatní nemocní, kteří vysoký krevní tlak nemají, náleží do skupiny označené „non-hypertonicí“.

Na rozdíl od tohoto klasického pojetí koncepce fuzzy množin [4, 5, 6] předpokládá, že prvky mohou do daného souboru patřit různou měrou. Příslušnost k určité fuzzy množině je vyjádřena stupněm příslušnosti, který může nabývat hodnot od pozice prvku mimo množinu (příslušnost se stupněm 0), přes částečnou příslušnost (příslušnost se stupněm např. 0,6) až po jednoznačné zařazení do dané množiny (příslušnost se stupněm 1). Fuzzy množina A tedy přiřazuje každému prvku x z určité množiny X prvků, které bereme v úvahu, nějaký stupeň $A(x)$, což je číslo z intervalu $[0,1]$. Přitom $A(x) = 0$ znamená, že prvek x do množiny A vůbec nepatří (nesplňuje daná kritéria), $A(x) = 1$ znamená, že prvek x do množiny A patří úplně a $0 < A(x) < 1$ znamená, že prvek x do množiny A patří částečně. Fakt $A(x) = 0,7$ můžeme také interpretovat tak, že pravdivostní hodnota tvrzení „ x patří do A “ (popř. „ x má vlastnost A “) je 0,7.

Fuzzy množiny umožňují popisovat jazykové výrazy, které nejsou ostře ohraničeny. Vraťme se k příkladu uvedenému výše u „jestliže-pak“ pravidel:

- Jestliže je při umělé plicní ventilaci hodnota EtCO_2 lehce zvýšená, pak pro dosažení normálních hodnot EtCO_2 musím na ventilátoru o něco zvýšit velikost dechového objemu (V_T).

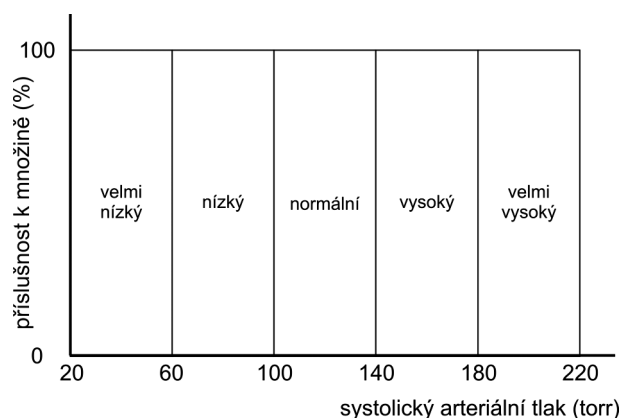
Vyjádření „zvýšit o něco“ je typickým příkladem. V dané souvislosti totiž neexistuje žádná ostrá hranice (odpovídající zvýšení dechového objemu např. o 300 ml), která by zvýšení dechového objemu rozdělila do dvou alternativ: zvýšení o méně než 300 ml by tak bylo kvalifikováno jako „mírné zvýšení“ (pravdivost 1), zatímco zvýšení o alespoň 300 ml by podmínky pojmu „mírné zvýšení“ nesplňovalo (pravdivost 0). „Mírné zvýšení“ dechového objemu je tedy neostře vymezené, je to vágní jazykový výraz, určité konkrétní hodnoty pod něj spadají více, jiné méně. Člověk obvykle při popisu svých znalostí používá vágní výrazy, jak jsme viděli v případě „jestliže-pak“ pravidel.

Stupeň pravdivosti, pomocí kterého je fuzzy množina definovaná, je něco jiného než stupeň pravděpodobnosti. Oba pojmy mají jinou povahu a jinak se s nimi také pracuje. Stupně pravděpodobnosti používáme pro vyjádření nejistoty, zda nastane nějaký jev (samotný jev může být vymezený ostře, např. „při hodu kostkou padne dvojka“, nebo vágně, např. „zítra bude teplé počasí“). Stupně pravdivosti používáme pro vyjádření míry, do jaké daný objekt spadá pod daný jazykový výraz (např. míry, do jaké spadá zvýšení dechového objemu o 300 ml pod výraz „mírné zvýšení“).

V jazykových výrazech odpovídají fuzzy množiny základním slovním výrazům, ze kterých skládáme složitější tvrzení. K vyhodnocování pravdivostních hodnot takových složených výrazů slouží tzv. operace s fuzzy množinami. Ty umožňují ze znalosti fuzzy množin, které odpovídají např. výrazům „pacienti s velkou bolestí hlavy“ a „pacienti s vysokým systolickým tlakem krevním“ vypočítat pravdivostní hodnotu tvrzení „pacient P má velké bolesti hlavy a vysoký systolický TK“. Nejdůležitějším příkladem složených výrazů jsou výrazy typu „jestliže-pak“. Na nich jsou založené pravidlové fuzzy systémy. Jejich podrobnější popis přesahuje rámec tohoto sdělení, zde jen nastíníme jejich základní konstrukci. Každý pravidlový systém sestává ze dvou částí. První z nich je vymezena sadou pravidel „jestliže-pak“, druhou část pak představuje inferenční mechanismus. Ten tvoří matematicky popsaná procedura, která postupy používané v daném pravidlovém systému konkretizuje. Určuje tedy, jak podle sady pravidel odvodit z hodnot vstupních veličin konkrétní hodnotu výstupní veličiny.

Výhoda uvažování ve smyslu fuzzy množin vyplývá z následujícího příkladu [7]. Mějme soubor několika měření systolického arteriálního tlaku. Konkrétní naměřené hodnoty, které leží v rozmezí od 20–220 torrů, zařadíme do pěti množin krevního tlaku, jež jsou popsány výrazy „velmi nízký“, „nízký“, „normální“, „vysoký“ a „velmi vysoký“.

Použijeme-li klasickou logiku (obr. 1), pak každá konkrétní hodnota tlaku patří vždy do jediné množiny (příslušnost k dané množině je tedy 100%). Toto rozdělení hodnot krevního tlaku se však přičí intuici. Pokud má totiž tlak hodnotu rovnou například největší hodnotě, při níž je klasifikován jako „nízký“, pak stačí jeho nepatrné zvýšení (např. o pouhý 1 torr) a klasifikace této tlakové hodnoty se přesouvá ze skupiny

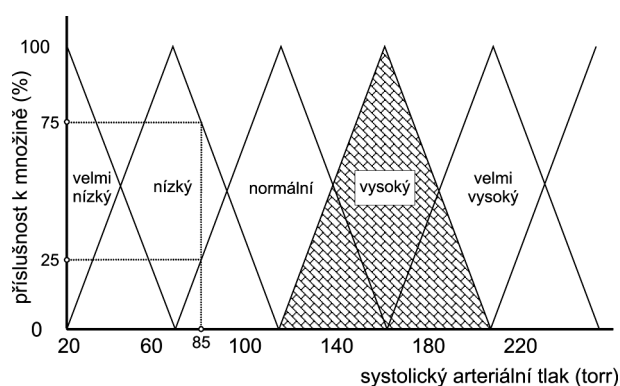


Obr. 1. Rozdělení hodnot systolického arteriálního tlaku do množin pomocí klasické logiky, volně podle [7]

Hranice množin mají obdélníkový tvar a nepřekrývají se.

„nízký“ do skupiny „normální“. Podle toho je hodnota tlaku 99 torrů interpretována jako „nízká“, ale 100 torrů již jako „normální“. To samozřejmě neodpovídá biologickému významu této změny o pouhý jediný torr.

Jestliže zařadíme hodnoty tlaku pomocí fuzzy množin (obr. 2), stane se popis lidskému chápání i lékařskému myšlení mnohem bližší. Každá konkrétní hodnota tlaku zde může náležet do jedné nebo více množin (zpravidla do dvou) – například tlak 85 torrů patří ze 75 % do množiny tlaků označované jako „nízký“ a zároveň z 25 % do množiny tlaků pojmenované jako „normální“. Opakovaně zdůrazňujeme, že tato koncepce fuzzy množin nesmí být zaměňována za pravděpodobnost. Náš výrok proto neznamena, že existuje 75% pravděpodobnost, že tlak 85 torrů patří do skupiny tlaků pojmenované „nízký“, ale vyjadřujeme jím tu skutečnost, že tento arteriální tlak je do určité míry „nízký“ a zároveň do určité (a to odlišné) míry „normální“. Získáváme tak způsob vyjadřování, kterému už počítač rozumí a umí s ním pracovat.



Obr. 2. Rozdělení hodnot systolického arteriálního tlaku do množin pomocí fuzzy logiky, volně podle [7]

Hranice každé množiny jsou trojúhelníkové a překrývají se s hranicemi sousedních množin. Např. šrafovaná oblast vyznačuje fuzzy množinu tlaků „vysoký“. Tečkovaná je znázorněna příslušnost hodnoty tlaku 85 torrů do odpovídajících množin – systolický tlak 85 torrů podle toho patří z 25 % do množiny tlaků „normální“ a ze 75 % náleží do množiny tlaků označené jako „nízký“.

Fuzzy logika v praktickém životě

Zatímco v některých oblastech je použití pravidlových fuzzy systémů v počátcích, v jiných se již tyto zákonitosti s úspěchem uplatňují rutinně. Nejznámější aplikační sférou je spotřební elektronika. Pravidlové fuzzy systémy tak nalezneme uvnitř praček (fuzzy logika nastavuje prací cyklus včetně množství napouštění vody a pracího prostředku i volby stupně ohřevu na základě množství a znečištění prádla), fotoaparátů a kamer (nastavení zaostření a expozice), vysavačů (nastavení sacího výkonu), mikrovlnných trub (řízení výkonu k co nejefektivnější úpravě jídla) apod. [8]. Využití fuzzy logiky přináší i jednoduchost obsluhy – odpadá složité nastavování mnoha parametrů, přístroje se často ovládají jediným tlačítkem. Mezi další příklady úspěšných aplikací pravidlových fuzzy systémů patří ovládání tavicích pecí nebo řízení vlaků metra – fuzzy systém používaný v tokijské podzemní dráze je dokonce natolik vyspělý, že strojvůdci jsou k udržování své erudice nasazováni k obsluze vlaků pouze mimo špičku v nočních hodinách [7]. Automatické převodovky automobilů (používá je např. i automobilka Škoda) či predikce geologických procesů jsou rovněž ukázkou využití regulačních fuzzy systémů.

Hlavní výhodou pravidlových fuzzy systémů je, že jsou matematickým modelem, který vzniká přímo ze zkušenosti popsané příslušným odborníkem a v jeho přirozeném jazyce. V řadě situací totiž ani jiný popis není k dispozici. Mezi další výhody patří, že fuzzy systémy jsou schopny popsat složité nelineární závislosti, a to pomocí překvapivě malého počtu pravidel. Nutno však přiznat, že získání kvalitní sady pravidel od experta není jednoduché a vyžaduje spolupráci dalšího zkušeného odborníka, tzv. znalostního inženýra. Ten musí jednak správně definovat a nastavit fuzzy množiny v pravidlech, především však z odborníka toho kterého oboru všechny náležitě znalosti „dostat“. Po definování těchto zákonitostí potom znalostní inženýr převede pravidla a nepřesná data do počítačového programu, který fuzzifikuje vstupní údaje, aplikuje příslušná pravidla a provede náležité operace podle inferenčního mechanismu. Nakonec procesem zvaným defuzzifikace nastaví odpovídající výstupní parametr systému.

Fuzzy logika v lékařství a anesteziologii

Vratme se k příkladu se systolickým arteriálním tlakem – nepřipomíná vám něco? Postupy, které charakterizují fuzzy množiny a operace s nimi, jsou velmi blízké způsobu uvažování lékaře. Ten většinou není schopen vyčerpávajícím a exaktním způsobem uvést, jak přesně dospěl k diagnóze a jak vede léčbu – algoritmus těchto činností zahrnuje i lékařovy osobní zkušenosti a pravidla, jejichž význam (váhu) lze jen obtížně kvantifikovat. Často je tato okolnost vyjadřována tím, že lékařství není čistá věda, ale zahrnuje v sobě i prvky umění. Většina úspěšných lékařů, jejichž práce je bezesporu vysoce efektivní, si jen málo uvědomuje přesný rozsah svých znalostí i způsoby, jakými jsou tyto vědomosti strukturovány [7].

Jaký je tedy přínos fuzzy logiky pro každodenní práci lékaře?

Způsob medicínského uvažování je často neurčitý a hraje v něm roli vágnost. Právě modelováním vágnosti se fuzzy logika zabývá, proto lze očekávat, že její význam pro lékařství v budoucnu poroste [8]. Fuzzy systémy se mohou již dnes uplatnit v celé řadě konkrétních situací z medicínské praxe.

Expertní systémy umějí přesně stanovit diagnózu a navrhnout nejefektivnější způsob léčby. Využívají přednostní výpočetní techniky, která je schopna bez poklesu výkonnosti provést bezchybně velké množství operací v krátkém čase. Zadáním vstupních podmínek mohou expertní systémy nabídnout řešení, která respektují individualitu a vůli nemocného jako nejvyšší prioritu a zároveň jsou nejvýhodnější z hlediska medicínského i ekonomického. Konkrétní aplikace expertních fuzzy diagnostických systémů představují např. počítačová interpretace skóre Apgarové v neonatologii [9], hodnocení cytologických nátěrů v patologii [10] nebo identifikace nádorových oblastí při US mamografii [11].

Zajímavým a bezesporu perspektivním využitím jsou zpětnovazební fuzzy regulační systémy (closed-loop fuzzy controllers). Jde o sofistikovaná zařízení, která jsou schopna udržet určitý parametr na zvolené cílové hodnotě záměrným ovlivňováním okolností, které velikost nebo hodnotu tohoto parametru podmiňují [12]. Příklady klinicky využitelných fuzzy regulačních systémů shrnuje tabulka 1 [13–25].

Tabulka 1. Příklady klinického využití fuzzy zpětnovazebních řídicích systémů v anesteziologii

Regulovaný parametr, vstupní proměnná	Způsob regulace
Glykémie	nastavení rychlosti infuzní pumpy s inzulinem [13]
EtCO ₂ při UPV	nastavení parametrů ventilátoru – dechový objem, frekvence [14, 15]
Hloubka celkové anestezie, inspirační frakce izofluranu	nastavení přívodu inhalačního anestetika odpařovačem [16]
Hloubka celkové anestezie, bispektrální index (BIS)	nastavení rychlosti infuzní pumpy s intravenózním anestetikem [17]
Hloubka celkové anestezie, evokované sluchové potenciály (AEP)	nastavení přívodu inhalačního nebo intravenózního anestetika [18, 19]
Hloubka celkové anestezie, arteriální tlak	nastavení inspirační frakce izofluranu [20]
Hloubka svalové relaxace	nastavení rychlosti infuzní pumpy s kurarimimetikem [21, 22, 23]
Arteriální tlak	nastavení rychlosti infuzní pumpy s vazopresorem nebo vazodilatátorem [24]
Intrakraniální tlak	nastavení rychlosti infuzní pumpy s propofolem [25]

Autoři mají vlastní zkušenosti s vývojem zařízení pro automatické udržení stabilní hloubky nervosvalové blokády v anesteziologii [26]. Během celkového znecitnění podává anesteziolog kromě anestetik a opiátů i periferní svalová relaxancia (kurarimimetika), která omezením přenosu na nervosvalové ploténce působí uvolnění až ochrnutí příčně pruhovaného svalstva. Monitorováním nervosvalového přenosu (NMT, neuromuscular transmission) můžeme hloubku blokády průběžně kvantifikovat a tuto informaci v pravidelných intervalech předávat z monitoru NMT do počítače. Software na bázi fuzzy logiky pak řídí rychlost lineárního dávkovače (infuzní pumpy), který aplikuje nemocnému intravenózně svalové relaxans. Jestliže je skutečná hodnota nervosvalové blokády nižší než požadovaná, systém zrychlí chod pumpy (a tím i zvýší přísun kurarimimetika). Pokud je naměřená hloubka bloku nadměrná, počítač sníží podávání relaxancia zpomalením lineárního dávkovače. Systém tak automaticky udržuje zvolenou hloubku nervosvalové blokády řízením rychlosti infuzní pumpy s kurarimimetikem. Zařízení lze doplnit samoučícím (self-learning) modulem, který umožňuje průběžné automatické změny pravidel regulace na základě odezvy nemocného. Zpětnovazební regulační systém dokáže zajistit kvalitnější svalovou relaxaci, než lze docílit opakovaným manuálním nastavováním rychlosti pumpy anesteziologem. Je schopen se vyrovnat s nelinearitou odpovědi blokády nervosvalového přenosu na změnu rychlosti přívodu kurarimimetika i s časovou prodlevou odpovědi na tuto změnu.

Zpětnovazebné regulační systémy představují krok k automatizaci celkové anestezie a efektivnějšímu využití léků během ní aplikovaných.

Literatura

1. Feynman, R. P., Leighton, R. B., Sands, M. *Feynmanove prednášky z fyziky*. 2. vydání. Bratislava : Alfa 1986, 451 s.
2. Shortliffe, E. H. *Computer-Based Medical Consultations: MYCIN*. 1. vydání. New York : Elsevier 1976, 264 p. ISBN 0-444-00179-4.
3. Zadeh, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, 8, p. 338–353.
4. Bělohávek, R. *Fuzzy Relational Systems: Foundations and Principles*. 1. vydání. New York : Kluwer 2002, 369 p. ISBN 0-306-46777-1.
5. Dubois, D., Prade, H. *Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications*. 1. vydání. New York : Academic Press 1980, 393 p. ISBN 0-12-222750-6.
6. Klir, G. J., Yuan, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. 1. vydání. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, PTR 1995, 574 p. ISBN 0-13-101171-5.
7. Asbury, A. J., Tzabar, Y. Fuzzy logic: new ways of thinking for anaesthesia. *Br. J. Anaesth.*, 1995, 75, p. 1–2.
8. Kosko, B. *Fuzzy Thinking*. 1. vydání. London : Flamingo 1994, 318 p. ISBN 0-00-654713-3.
9. Shono, H., Oga, M., Shimomura, K., Yamasaki, M., Ito, Y., Muro, M., Sugimori, H. Application of fuzzy logic to the Apgar scoring system. *Int. J. Biomed. Comput.*, 1992, 30, p. 113–123.
10. Tsakonas, A., Dounias, G., Jantzen, J., Axer, H., Bjerregaard, B., von Keyserlingk, D. G. Evolving rule-based systems in two medical domains using genetic programming. *Artif. Intell. Med.*, 2004, 32, p. 195–216.
11. Guo, Y., Cheng, H. D., Huang, J., Tian, J., Zhao, W., Sun, L., Su, Y. Breast ultrasound image enhancement using fuzzy logic. *Ultrasound Med. Biol.*, 2006, 32, p. 237–247.
12. Westenskow, D. R. Fundamentals of feedback control: PID, fuzzy logic, and neural networks. *J. Clin. Anesth.*, 1997, 9, Supplementum 6, p. 33S–35S.
13. Ibbini, M. A PI-fuzzy logic controller for the regulation of blood glucose level in diabetic patients. *J. Med. Eng. Technol.*, 2006, 30, p. 83–92.
14. Schaublin, J., Derighetti, M., Feigenwinter, P., Petersen-Felix, S., Zbinden, A. M. Fuzzy logic control of mechanical ventilation during anaesthesia. *Br. J. Anaesth.*, 1996, 77, p. 636–641.
15. Bates, J. H., Hatzakis, G. E., Olivenstein, R. Fuzzy logic and mechanical ventilation. *Respir. Care Clin. N. Am.*, 2001, 7, p. 363–377.
16. Curatolo, M., Derighetti, M., Petersen-Felix, S., Feigenwinter, P., Fischer, M., Zbinden, A. M. Fuzzy logic control of inspired isoflurane and oxygen concentrations using minimal flow anaesthesia. *Br. J. Anaesth.*, 1996, 76, p. 245–250.
17. Shieh, J. S., Kao, M. H., Liu, C. C. Genetic fuzzy modelling and control of bispectral index (BIS) for general intravenous anaesthesia. *Med. Eng. Phys.*, 2006, 28, p. 134–148.
18. Allen, R., Smith, D. Neuro-fuzzy closed-loop control of depth of anaesthesia. *Artif. Intell. Med.*, 2001, 21, p. 185–191.
19. Huang, J. W., Lu, Y. Y., Nayak, A., Roy, R. J. Depth of anaesthesia estimation and control. *IEEE Trans Biomed. Eng.*, 1999, 46, p. 71–81.
20. Jensen, E. W., Nebot, A., Caminal, P., Henneberg, S. W. Identification of causal relations between haemodynamic variables, auditory evoked potentials and isoflurane by means of fuzzy logic. *Br. J. Anaesth.*, 1999, 82, p. 25–32.
21. Ross, J. J., Mason, D. G., Linkens, D. A., Edwards, N. D. Self-learning fuzzy logic control of neuromuscular block. *Br. J. Anaesth.*, 1997, 78, p. 412–415.
22. Edwards, N. D., Mason, D. G., Ross, J. J. A portable self-learning fuzzy logic control system for muscle relaxation. *Anaesthesia*, 1998, 52, p. 136–139.
23. Mason, D. G., Ross, J. J., Edwards, N. D., Linkens, D. A., Reilly, C. S. Self-learning fuzzy control with temporal knowledge for atracurium-induced neuromuscular block during surgery. *Comput. Biomed. Res.*, 1999, 32, p. 187–197.
24. Zbinden, A. M., Feigenwinter, P., Petersen-Felix, S., Hachsalizade, S. Arterial pressure control with isoflurane using fuzzy logic. *Br. J. Anaesth.*, 1995, 74, p. 66–72.
25. Huang, S. J., Shieh, J. S., Fu, M., Kao, M. C. Fuzzy logic control for intracranial pressure via continuous propofol sedation in a neurosurgical intensive care unit. *Med. Eng. Phys.*, 2006, 28, p. 639–647.
26. Adamus, M., Belohlavek, R., Koutna, J., Zacpal, J. Automatic control of rocuronium-induced neuromuscular block. *Eur. J. Anaesthesiol. Suppl.*, 2004, 21, Supplement 32, p. 22.

Práce vznikla za podpory grantového projektu IGA MZ ČR ND7665-3/2003.

Došlo 10. 8. 2006.

Přijato 22. 8. 2006.

Adresa pro korespondenci:
MUDr. Milan Adamus, Ph.D.
Kaštanová 11